



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**HODNOCENÍ ZANÁŠENÍ POTRUBÍ V CEMENTÁRNĚ**

EVALUATION OF PARTICLE DEPOSITION RATE IN CEMENT PLANT DUCTWORK

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Michal Dorniak**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jiří Vondál, Ph.D.**

**BRNO 2020**

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Michal Dorniak**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Vondál, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Hodnocení zanášení potrubí v cementárně

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V úzké spolupráci s průmyslovým partnerem budou zkoumány důvody a podmínky zanášení potrubí v cementárně. Účelem je vyhodnotit možné úspory energie pro pohon spalinových ventilátorů při snížení tlakových ztrát v potrubí. Studováno bude zanášení a jeho vliv na tlakové ztráty a dále vliv teploty a přestup tepla na tlakovou ztrátu.

### Cíle bakalářské práce:

- Určení možných úspor v provozu cementárny v oblasti pohonu spalinových ventilátorů.
- Vyhodnocení vlivu nánosů v potrubí na tlakovou ztrátu.
- Zaznamenání praktických zkušeností v cementárně s tvorbou nánosů.
- Identifikace míst s potenciálem úspor po změně tvaru potrubí.

### Seznam doporučené literatury:

GOMES, L. M. a A. L. A. MESQUITA. On the prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying. Brazilian Journal of Chemical Engineering [online]. 2014, 31(1), 35–46. ISSN 0104-6632. Dostupné z: doi:10.1590/S0104-66322014000100005

MAGRILA, R.. Modifikace vlastností portlandských cementů orientovaná na snížení emisí CO<sub>2</sub> [online]. Brno, Czech Republic, 2013 [vid. 2017-01-20]. Diploma thesis. Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=77785](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=77785)

IMBABI, M. S., C. CARRIGAN a S. MCKENNA. Trends and developments in green cement and concrete technology. International Journal of Sustainable Built Environment [online]. 2012, 1(2), 194–216. ISSN 2212-6090. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsbe.2013.05.001

KEEFE, B.P. a R.E. SHENK. An innovative solution for waste utilization. In: Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003: Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003 [online]. 2003, s. 197–206. Dostupné z: doi:10.1109/CITCON.2003.1204721

CHU, K.. CFD-DEM Simulation of Complex Particle-Fluid Flows. B.m., 2010. Doctor of Philosophy. The University of New South Wales.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**Abstrakt**

Predložená bakalárska práca sa zaoberá výpočtom tlakových strát v potrubí cementárne a v konečnom dôsledku, jej vplyvom na spotrebu elektrickej energie spalinovými ventilátormi. V úvode práce bola spracovaná literárna rešerš popisujúca princípy a spôsoby fungovania cementárenského priemyslu. V ďalších častiach je pozornosť venovaná výpočtom trecích, odporových súčiniteľov pokrývajúcich rôzne typy prúdenia. Samostatne pre plyn a samostatne aj pre častice. V praktickej časti bol navrhnutý vlastný výpočtový model na výpočet tlakových strát pre všeobecnú konfiguráciu potrubného systému. V závere práce bola zhodnotená závislosť medzi tlakovými stratami a spalinovými ventilátormi.

**Abstract**

The submitted thesis deals with calculation of pressure drop in pipeline of cement industry, which is directly correlated with energy consumption of raw mill exhaust fans. The introduction in submitted thesis describes theoretical basics of cement production. Part of theoretical analysis is about detailed study of calculations of different friction factors. Separately for gas and separately for solids. In the practical part, a mathematical model of universal configuration of pipeline for pressure drop calculations was created. The last part evaluate impacts of pressure drop on energetic demands of raw mill exhaust fans.

**Kľúčové slová**

tlakové straty, zanášanie potrubia, odpory pri prúdení, matematické modelovanie

**Keywords**

pressure drop, sedimentation of pipeline, flow resistance, mathematical modeling

### **Bibliografická citácia**

DORNIAC, Michal. *Hodnocení zanášení potrubí v cementárně*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132671>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Vondál.

**Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že predloženú bakalársku prácu som vypracoval samostatne s použitím literatúry uvedenej v závere práce.

V Brne, dňa .....

.....

Michal Dorniak

### **Pod'akovanie**

Na tomto mieste by som chcel pod'akovať svojmu vedúcemu Ing. Jiřímu Vondálovi, Ph.D. za cenné konzultácie a rady, ktoré mi pri tvorbe tejto bakalárskej práce poskytol.

.....

Michal Dorniak

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Technológia výroby cementu.....	11
2.1 Ťaženie surovín .....	11
2.2 Výpal slinku .....	11
2.2.1 Výmenník tepla .....	12
2.2.2 Predkalcinátor.....	13
2.2.3 Bypassový systém .....	14
2.2.4 Rotačná pec .....	14
2.2.5 Chladič slinku.....	15
2.3 Mletie slinku.....	15
3. Tlakové straty .....	16
3.1 Cyklónové stupne.....	16
3.2 Pneumatický dopravný systém.....	17
4. Výpočet tlakových strát .....	18
4.1 Základné znalosti potrebné k výpočtu.....	18
4.1.1 Prúdenie .....	18
4.1.2 Viskozita.....	19
4.1.3 Pórovitosť $\varepsilon$ .....	20
4.1.4 Pádová rýchlosť častíc $U_t$ .....	20
4.2 Tlakový spád spôsobený prúdením samostatného plynu .....	22
4.2.1 Trenie plynu.....	22
4.2.2 Tlakový spád spôsobený počiatočným urýchlením plynu.....	25
4.2.3 Tlakový spád plynu spôsobený miestnymi odpormi .....	26
4.3 Tlakový spád spôsobený prítomnosťou častíc .....	26
4.3.1 Trenie materiálu.....	26
4.3.2 Tlakový spád spôsobený počiatočným urýchlením častíc.....	28
4.3.3 Tlaková strata pri priechode materiálu oblúkom.....	29
4.3.4 Tlaková strata zdvihom častíc .....	30
5. Praktická časť.....	31
5.1 Prvá konfigurácia potrubného systému (A) .....	31
5.1.1 Vlastnosti prúdiaceho plynu .....	32
5.1.2 Výpočet tlakovej straty .....	33
5.2 Druhá konfigurácia potrubného systému (B).....	37



5.3 Predpripravený výpočtový model v Exceli .....	40
5.3.1 Možnosti modelu .....	40
5.3.2 „Odchýlky“ spôsobené samostatnosťou modelu .....	41
5.4 Grafické znázornenie popisujúce zanášanie potrubia .....	43
5.5 Potrebný výkon ventilátoru a spotreba energie .....	46
6. Záver .....	48
Zoznam použitých zdrojov .....	49
Zoznam použitých symbolov a skratiek .....	51

## 1. Úvod

Cement. Jedna z esenciálních složek betonu. Známý jako jeden z nejstarších stavebních materiálů. Koncem dvadsiátého století se stal najdominantnějším a najrozšířenějším stavebním materiálem pro všeobecné použití.

Cementářský průmysl, ako aj ostatné stavebné priemysly, v dnešnej dobe čelia náročným energetickým, ekonomickým a ekologickým výzvam. Neúprosne sa zvyšujúca cena energií, vzhľadom na obmedzené množstvo fosílnych palív sa prejaví na celkových nákladoch výroby cementu a v konečnom dôsledku aj na jeho trhovej cene. Ekologická daň spôsobená nedodržiavaním prísnych emisných opatrení, vytvára len dodatočné výdavky, ktoré môžu potencionálne viesť na zdvojnásobenie ceny cementu už do roku 2030 [1].

Potreba začleniť využívanie alternatívnych palív do nielen cementárskeho priemyslu, je preto neodkladná. Zvýšené využívanie obnoviteľných zdrojov a alternatívnych palív môže pomôcť vyriešiť súčasnú situáciu spôsobenú spaľovaním konvenčných palív. Prvými alternatívnymi palivami, ktoré boli v cementárňach využívané boli odpadové oleje. Dnes už medzi náhrady neobnoviteľných zdrojov energie patria dokonca aj použité pneumatiky, pri ktorých bolo úspešne dokázané súbežné materiálové a energetické využitie. Termický rozklad organických materiálov pri spaľovaní alternatívnych palív za nízkeho parciálneho tlaku kyslíku vo vznikajúcich plynach v kalcinačnom kanále, teda v mieste s najväčšou tepelnou spotrebou, je možný za nižších teplôt v porovnaní s teplotami v rotačnej peci. Tento proces je významný hlavne kvôli výrazne menším emisiám  $\text{NO}_x$ , ako keby táto energia bola dodávaná hlavným horákom [2].

V tabuľke č. 1 sú zobrazené aktuálne platné emisné limity určené pre výrobu cementárskeho slinku v rotačných peciach [3].

Tab. 2 zobrazuje ďalšie emisné limity podľa Záveru o BAT z 12.11.2019 (best available techniques), ktoré sú záväzné aj pre iné európske krajiny tak, aby prísne usmerňovali výrobné jednotky a viedli ich k minimalizácii znečisťovania. Je treba poznamenať, že sa jedná o výber tých najprísnejších emisných limitov, väčšie limity pre spaľovanie palív tu uvedené nie sú.

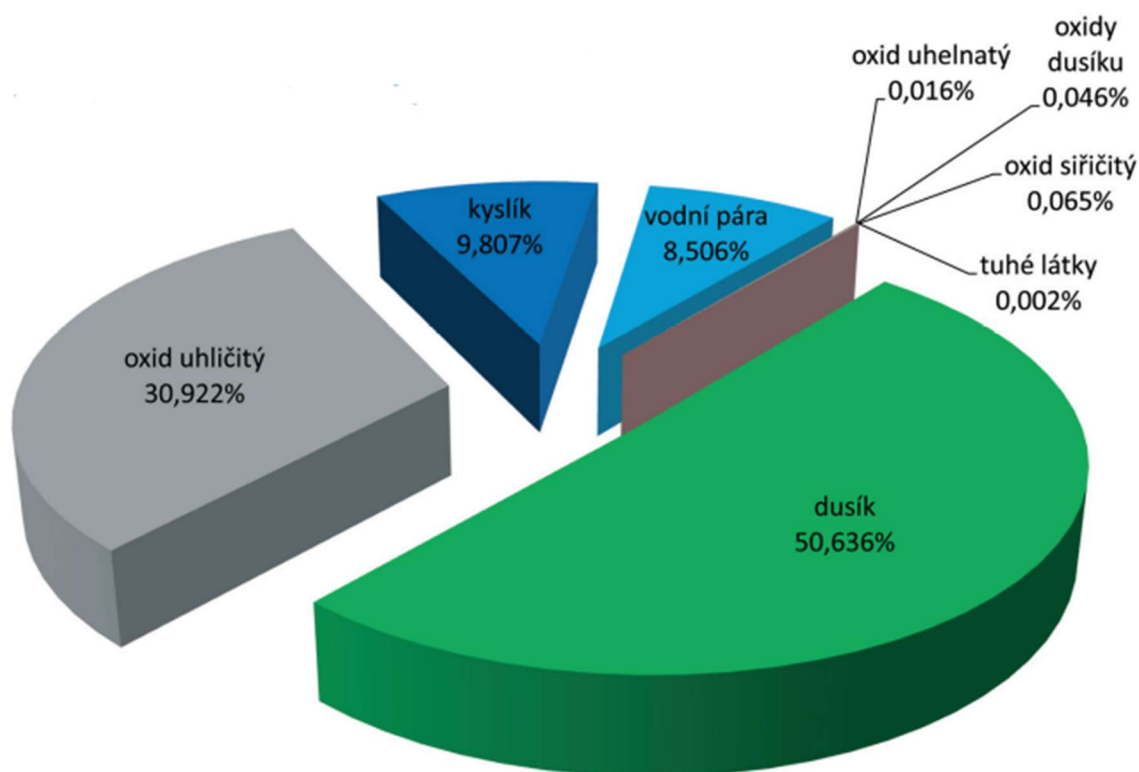
**Tab. 1** Emisné limity pre výrobu slinku [3]

Znečisťujúca látka	Povolené množstvo	Priemerované obdobie
	[mg/Nm <sup>3</sup> ]	
TZL	< 30	Denný priemer
SO <sub>2</sub>	< 400	Denný priemer
NO <sub>x</sub>	< 500	Denný priemer

**Tab. 2** Emisné limity pre spoluspaľovanie odpadov [4]

Znečisťujúca látka	Povolené množstvo	Priemerované obdobie
CO	10 - 50	Denný priemer
TVOC	< 3 - 10	Denný priemer
Hg	1 - 10	Dlhodobý odber vzoriek
Cd + Tl	0,005 – 0,02	Priemer za obdobie odberu vzoriek
PCDD/D	< 0,01 – 0,06	Dlhodobý odber vzoriek

Znečisťujúce látky z pohľadu zákona o ochrane ovzdušia, tvoria zanedbateľný podiel toku odpadného plynu odchádzajúceho z komína cementárne. Aký konkrétne, je zobrazené na obr. 1 zostaveného na základe skutočného reprezentatívneho merania.

**Obr. 1** Hmotnostné zloženie odpadového plynu z cementárenskej rotačnej pece [2]

Zaujímavé je, že kým maximum obmedzujúcich opatrení v oblasti emisií dopadá na priemysel, emisie z dopravy a domácností sú kontrolované a obmedzované v oveľa menšej miere.

Aj napriek vyššie spomenutým obmedzeniam, aj napriek záujmu priemyslu žiť v nezhoršujúcom sa životnom prostredí a neustálemu zdokonaľovaniu výrobného procesu, je cementárenský priemysel zodpovedný za približne 6 % celosvetovej produkcie uhlíkových emisií [1]. Pochopenie výrobného procesu cementu je preto pre účinnú redukciu nielen ekologických a energetických nákladov kľúčové.

## 2. Technológia výroby cementu

Proces, ktorým je cement spracovávaný, závisí od techniky homogenizácie základných surovín. Poznáme dva základné spôsoby spracovania, mokrý a suchý výrobný spôsob. V dnešnej dobe celosvetovo prevláda suchý spôsob nad mokrým, predovšetkým kvôli výraznej úspore tepelnej energie pri spaľovacom procese. Všetky momentálne prevádzkované cementárenské pece v Českej republike sú konštruované pre suchý proces výpalu slinku. Vzhľadom na vyššie spomenuté skutočnosti sa bude prezentovaná práca zameriavať len na suchý spôsob spracovania cementu [5].

### 2.1 Ťaženie surovín

Produkcia výroby portlandského cementu sa začína ťažbou základných surovín, ktoré pozostávajú predovšetkým z vápenca a spevnených ílov. Ťaženie surovín je vykonávané v povrchových lomoch trhacími prácami za pomoci clonových odstrelov, ktorým predchádza vrtanie záhlavných vrtov. Každé miesto ťaženia je definované chemickým zložením suroviny. Naloženie odstrelenej suroviny prebieha selektívne podľa požadovaných chemických parametrov pre materiál predhomogenizačnej skládky.

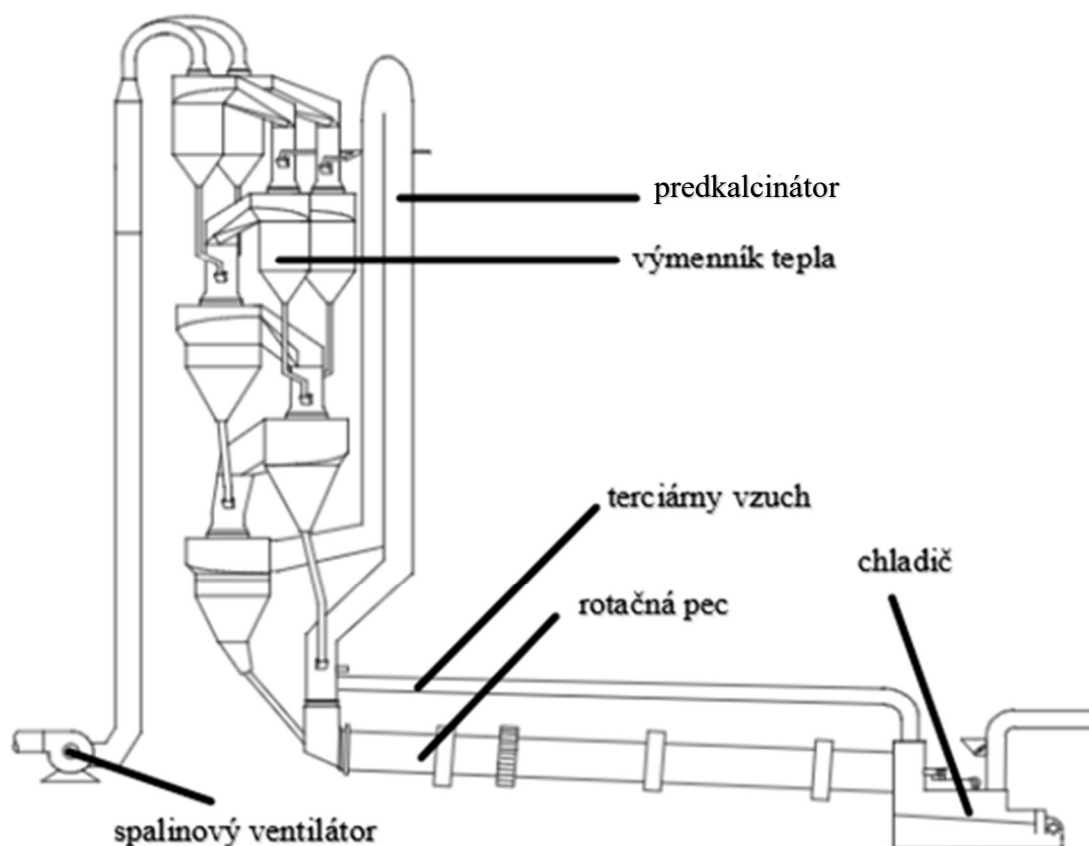
Takto pripravená surovina je transportovaná do násypiek primárnych drvičov, ktoré pozostávajú z čeľust'ových a kužel'ových drvičov. V druhom stupni drvenia nachádzajú uplatnenie kladivo-odrazové drviče. V prípade extrémne tvrdej a ťažko rozdeliteľnej suroviny môže cementáreň disponovať aj terciárnym stupňom drvenia. [5]

Nadrvený materiál je pásovými dopravníkmi dopravený na predhomogenizačnú skládku, kde je materiál pomocou vozíku pozdĺžne rozvázaný po celej skládke rovnomerne, čo zabezpečuje homogenizáciu. Ďalšie spracovanie prebieha za pomoci škrabákového zakladača naprieč jednotlivými vrstvami, čím sa efekt homogenizácie len posilní.

Takto pripravený materiál je prepravený do guľových mlynov, kde je jeho chemické zloženie upravené korekčnými surovinami. Mletie patrí k najdôležitejším fázam prípravy vstupných surovín pred výpalom. Podrvená a primárne homogenizovaná surovina je počas procesu mletia mletá na surovinovú múčku. Jemnosť surovinovej múčky má rozhodujúci význam na rýchlosť tvorby slinky pri procese jeho tvorby.

### 2.2 Výpal slinku

Spaľovací systém (obr. 1) pozostávajúci z viacstupňového výmenníka tepla, predkalcinátoru (v posledných rokoch doplneným bypassovým systémom), rotačnej pece a chladiča slinku sa preukázal ako energeticky a environmentálne najprogresívnejší systém. Patrí k najlepším dostupným technikám pre výpal slinku. Takto konštruovaný a prevádzkovaný pecný systém, predstavuje dokonalý systém pre zachytenie a bezodpadové zneškodnenie škodlivín vznikajúcich pri spaľovacom procese. [2]

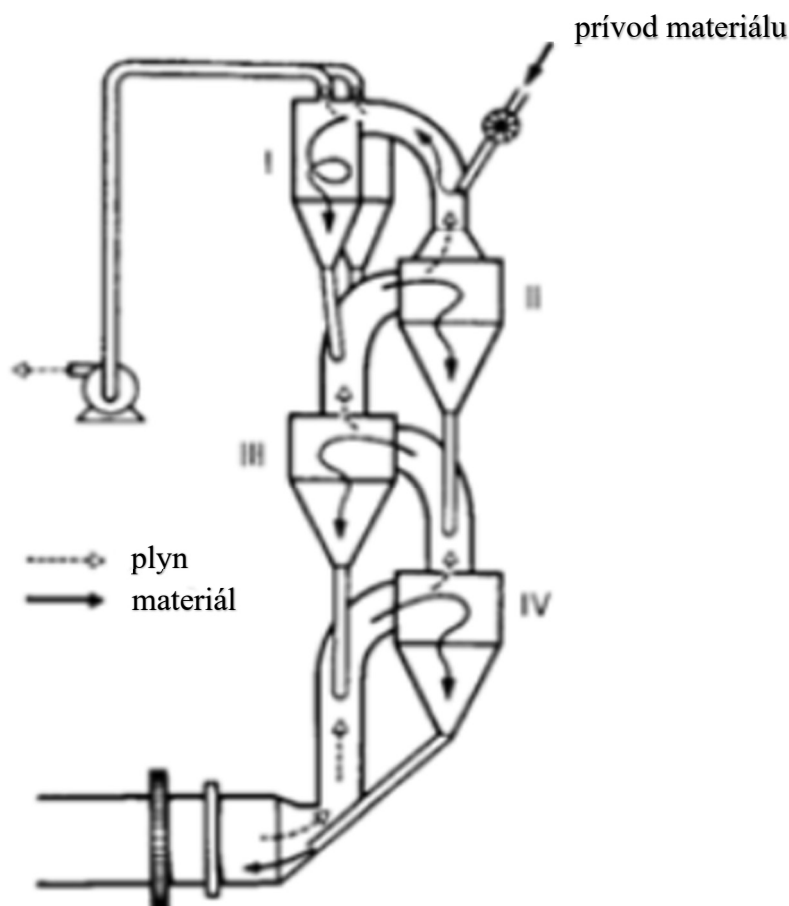


**Obr. 1** Schematické zobrazenie spaľovacieho systému [7]

### 2.2.1 Výmenník tepla

Jemne pomletá surovinová múčka, skladajúca sa predovšetkým z vápenca a určitého množstva korekčných surovín upravujúcich chemické zloženie, vstupuje do disperzného výmenníku tepla. Tento systém má spravidla štyri stupne, v ktorom počas priameho kontaktu jemne rozmlätého vápenca s plynmi vznikajúcimi z procesu horenia dochádza k prenosu tepla na surovinu pri jej priechode paralelnými tokmi plynu v cyklónových stupňoch [2]. Prenos tepla na surovinu je závislý na optimálnej distribúcii surovínovej múčky a na efektívite separácie častíc v cyklónoch zabezpečujúcich maximálnu redukciu tlakových strát.

Obr. 2 znázorňuje tepelný výmenník so štyrmi cyklónovými stupňami bez predkalcinátora (ten ale momentálne nie je podstatný). Obrázok slúži k pochopeniu prúdenia spaľinových plynov a materiálu v cyklónových stupňoch.



**Obr. 2** Štvorstupňový výmenník tepla bez predkalcinátora [8]

### 2.2.2 Predkalcinátor

Takmer všetky moderné pecné systémy sú vybavené predkalcinátorom, ktorý je súčasťou disperzného výmenníku tepla. Zavedenie predkalcinačnej technológie umožňuje spaľovanie alternatívnych palív a čiastočnú kalcináciu surovínovej múčky mimo rotačnej pece, čo umožnilo redukciu ich dĺžky. Kalcinácia, známa aj ako dekompozícia vápenca, je popísaná rovnicou (1) [6]. Množstvo zkalcinovanej surovínovej múčky presahuje 90 % ešte pred vstupom do rotačnej pece, ak 50-60 % celkového požadovaného paliva pre výrobu slinku je dodaného spaľovaním alternatívnych palív v spaľovacej komore predkalcinátora. Materiál vstupujúci do rotačnej pece z predkalcinátora dosahuje teplôt až 850-900 °C [9].



Zavedenie využívania alternatívnych palív bolo nevyhnutné kvôli obmedzeným zásobám fosílnych palív a taktiež kvôli narastajúcim požiadavkám na znižovanie emisií. Využívanie iných palív v porovnaní s konvenčnými, ako je napríklad biomasa, môže byť efektívnou náhradou fosílnych palív. Táto náhrada dokáže znížiť produkciu  $\text{CO}_2$  až o 20-25 % v porovnaní so spaľovaním uhlia [1]. Aj napriek mnohým výhodám alternatívnych

palív, množstvo ich substitúcie za konvenčné palivá je limitované. Spaľovanie týchto palív zabezpečuje, že organické látky sú zneškodnené vďaka vysokým teplotám v predkalcinátore, oxidačnej atmosfére a zásaditému prostrediu, ale anorganické látky, vrátane ťažkých kovov ostávajú uväznené vo vznikajúcom slinku. To môže ovplyvniť výslednú charakteristiku cementu.

### 2.2.3 Bypassový systém

Predhriata surovina z výmenníku tepla s predkalcinátorom vstupuje do vlastnej rotačnej pece cez chloridový bypassový systém. Spaľovanie palív obsahujúcich vyšší obsah síry, chlóru, sodíku a draslíku (napríklad spomínané alternatívne palivá), môžu zapríčiniť zvýšenú záťaž na spalínové ventilátory zapríčinenú prídavnými tlakovými stratami [7]. Zatiaľ čo konvenčné palivá sa pred použitím podrvia na jemný prášok, tak alternatívne palivá sú väčšinou spracované len vo forme milimetrových až centimetrových častíc. Čo má za následok možné nedokonalé spaľovanie. Pri nedokonalej oxidácii spaľovaného paliva v predkalcinátore alebo rotačnej peci dochádza k zvýšenej vnútornej cirkulácii zlúčenín obsahujúcich prchavé anorganické prvky ako sú S, Cl, Na a K. Keď sú spomínané zlúčeniny vystavené vyšším teplotám (v kalcinátore alebo rotačnej peci), dochádza k ich vyparovaniu. Pri ich ďalšom postupovaní systémom sa dostanú do častí, kde teplota nie je až tak vysoká a začnú kondenzovať. Tento proces sa opakuje. Pri kondenzácii cirkulujúcich prvkov na časticách postupujúcej surovinovej múčky sa formuje vysoko priľnavá zmes, čo spôsobuje zanášanie potrubia. Rôzne prvky majú rôzne teploty, pri ktorých dochádza ku kondenzácii čo znamená, že nežiadané nánosy vznikajú na rôznych miestach. Napr. kondenzácia chlóru v daných podmienkach nastáva medzi 750 °C až 800 °C a spôsobuje zanášanie prevažne nižších stupňov cyklónov. Moderné pecné systémy sú vybavené tzv. bypassovým systémom. Bypassový systém má za úlohu extrahovanie častí plynov vystupujúcich z rotačnej pece, ochladenie extrahovaného plynu a separáciu prachových častíc. Bypassový systém sa nachádza nad vstupom do rotačnej pece, pretože plyn extrahovaný v tomto mieste obsahuje vysokú koncentráciu plynného chlóru a nízke množstvo prachových častíc. Prudké ochladenie plynu má za následok iniciáciu kondenzácie Cl. Takto ochladený plyn je vedený do bypassového cyklónu, kde dochádza k separácii prachu od plynu. Pomocou tejto technológie sme schopní znížiť koncentráciu Cl typicky až o 15 % [16]. Využívanie bypassového systému má taktiež negatívny dôsledok na zvýšenú spotrebu elektrickej energie, ktorá nadobúda hodnoty 2 KWh/t [15]. Extrakcia plynu priamo za rotačnou pecou vedie k zvýšenej tepelnej spotrebe, ktorá predstavuje až 6-12 MJ/t slinku na percento odobraného plynu [16].

### 2.2.4 Rotačná pec

Čiastočne zkalcinovaná surovinová múčka, zbavená nadmerného množstva chlóru vstupuje do rotačnej pece, kde postupuje proti prúdu plynov vznikajúcich z procesu horenia, pričom jej teplota stále stúpa.

Dochádza k rozkladu vápenca a uvoľnený oxid vápenatý reaguje s ďalšími zložkami surovinovej zmesi za vzniku slinkových minerálov. Počas ďalšieho postupu sa materiál dostáva do tzv. slinovacieho pásma pece, kde je teplota tak vysoká, že nastáva vznik taveniny. Približne 1 450 °C. Za týchto podmienok dochádza k vzniku hlavných

slinkových materiálů a v průběhu tohoto procesu se v jejich krystalové mřížce pevně viažou atomy tzv. těžkých kovů. Vzniklá vazba je velmi pevná. [2]

### 2.2.5 Chladič slinku

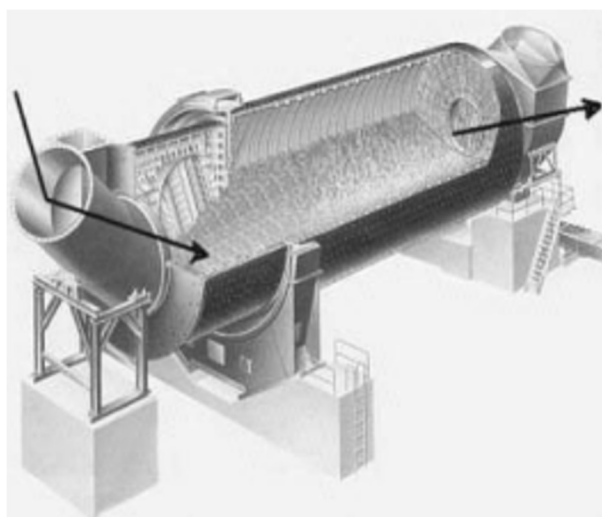
Posledním stádiem při procese výpalu slinku je jeho chlazení. Jeho podstatou je, aby minerály a tavenina vzniklá v rotační peci zotrvávali v rovnací nebo stabilnější modifikaci. Slink je po výpale nutné velmi rychle ochladit a zabezpečit tím jeho pretrvání ve vysokoteplotní modifikaci. Mikrostruktura vzniklého slinku po ochlazení má významný vliv na hydraulické vlastnosti. Například rovnakému chemickému složení slinků, které se liší jen mikrostrukturou, se jejich vlastnosti liší. [8]

## 2.3 Mletie slinku

Před uskladněním slinku v krytých halách nebo silách dochází k jeho podrobení na částice o velikosti 5-10 mm. Drvenie prebieha v kužeľových alebo odrazových drvičoch. Následné odloženie podrobeného slinku trvá približne 3 týždne. V ďalšom kroku je slinok dopravovaný do mlynice spolu so sadrovcom alebo inými prísadami, kde sa melie na požadovanú jemnosť. [9]

Jemnosť mletia je zásadná výrobná operácia vzhľadom k použitiu cementu. Jemne mleté cementy rýchlo hydratujú (majú menší merný povrch), majú väčšie počiatkové a konečné pevnosti, vyvíjajú väčšie hydratačné teplo a pri spracovaní sú plastickejšie. Mlyn používaný pre mletie slinku je väčšinou komorový guľový mlyn (obr. 3). Mletie je energeticky veľmi náročný proces. Pre zníženie spotreby energie sa do cementu pridávajú aktivátory mletia.

Vyprodukovaný cement požadovanej kvality je pneumatically alebo mechanicky dopravovaný do železobetónových síl, z ktorých je cement neskôr expedovaný.



**Obr. 3** Guľový mlyn [2]



### 3. Tlakové straty

Tlakové straty, neefektívna separácia častíc a nežiadané nánosy vedú k zvýšeniu energetickej náročnosti celého procesu, ale takisto aj k zvýšeniu nákladov na produkciu cementu. Efektívne zníženie tlakových strát je veľmi dôležité ako z energetického, tak aj z ekonomického hľadiska. V pecnom systéme je redukcia tlakových strát fundamentálna pre pohon spalínových ventilátorov, kde každý  $J$  ušetrenej energie hrá dôležitú úlohu pre celkovú úspešnosť cementárne.

#### 3.1 Cyklónové stupne

V niektorých prípadoch až 20 % surovínovej múčky opustí vežu predhrievača s prúdiacim plynom bez toho, aby prešli jednotlivými cyklónovými stupňami [7]. Vrchné cyklóny vyžadujú sofistikovaný dizajn na minimalizovanie tlakových strát, ale primárne je požadovaná vysoká efektivita separácie častíc. Geometria nižších cyklónov kladie väčší dôraz na účinnosť znižovania tlakových strát v porovnaní s vrchnými. Podobnosť vrchných aj nižších cyklónov nachádzame v absencii horizontálnych povrchov. Zdôvodnené je to zamedzením akumulovania materiálu v nich a tým zároveň zabezpečujú stabilizáciu separácie. V spodnej časti každého cyklónu sa nachádzajú kyvadlové klapky, ktoré zabráňujú spätnému prúdeniu plynu medzi jednotlivými stupňami. Spätné prúdenie plynu by inak spôsobovalo drastickú redukciu separácie častíc vyššieho stupňa.

Obr. 4 a obr. 5 znázorňujú rozdiel v geometrii cyklónov pre vrchné a nižšie stupne výmenníka tepla.



**Obr. 4** Cyklón s vysokou efektivitou separácie častíc [11]



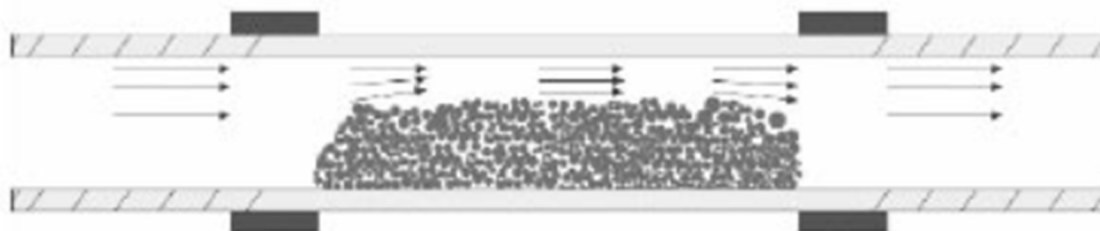
**Obr. 5** Cyklón zabezpečujúci nízke tlakové straty [11]

Po zavedení predkalcinačnej technológie sa v cementárenskom priemysle stavali štvorstupňové výmenníky tepla, ktoré sa stali štandardom na dlhé roky. Každý cyklónový stupeň bol zodpovedný za tlakové straty približne 15 mbar [7]. S postupnou inováciou a modernizáciou priemyslu sa trend posunul na 5-6 stupňové výmenníky s tlakovou stratou 5-10 mbar pre každý stupeň [7].

### 3.2 Pneumatický dopravný systém

Vďaka kvadratickej závislosti rýchlosti prúdiaceho plynu a tlakových strát je udržanie rýchlosti plynu medzi jej medznými hodnotami skutočne podstatné. Požadované znižovanie rýchlosti za účelom dosiahnutia minimálnej možnej tlakovej straty, môže viesť k nedostačujúcej rýchlosti pre udržanie častíc v pohybe. Prejavilo by sa to zhoršenou tepelnou výmenou, vyššími teplotami plynu vo vrchných stupňoch tepelného výmenníku, čoho následkom by bola zvýšená tepelná spotreba [7]. Minimálna rýchlosť pre udržanie častíc v pohybe sa nazýva sedimentačná rýchlosť. Klesnutie pod túto hodnotu sprevádza usadzovanie častíc s následným vznikom neželaných nánosov. Vznik nánosov je posilnený aj kondenzáciou zlúčenín síry a chlóru, ktoré vznikajú pri spaľovaní. Ak by rýchlosť prúdiaceho plynu bola oveľa vyššia ako je potrebné, viedlo by to k zbytočným energetickým stratám, zvýšenému treniu častíc a nadmernej erózii potrubia [10]. Druhá medzná rýchlosť, definujúca minimálnu rýchlosť pre uvedenie častíc do pohybu je známa ako vznosová rýchlosť. Znalosť týchto rýchlostí je kritická pre efektívne navrhnutie a nastavenie pneumatického dopravného systému.

Obr. 2 vizuálne znázorňuje zanesené potrubie spôsobené nedostatočnou rýchlosťou prúdiaceho plynu.



**Obr. 6** Zanesené potrubie [10]

## 4. Výpočet tlakových strát

Jedným z cieľov prezentovanej bakalárskej práce je detailnejšie sa zamerať na tlakové straty v potrubí cementárne spôsobené vplyvom trenia, ktoré je zapríčinené interakciou medzi jednotlivými časticami prenášanými prúdom plynu, častíc so stenou potrubia a plynom so stenou potrubia.

Pri výpočte celkovej tlakovej straty  $\Delta p_{celk}$  môžeme využiť tzv. princíp aditívnosti. Princíp aditívnosti je založený na tom, že celkový tlakový spád sa rovná súčtu tlakového spádu pri prúde samostatného plynu v reálnych podmienkach, ktoré sú v potrubí a prídavného tlakového spádu, vyvolaného prítomnosťou častíc v prúdiacom plyne. Pri praktickom výpočte sa potom obidva tlakové spády ďalej členia na jednotlivé zložky podľa povahy prekonávaných síl. Exaktné riešenie priebehu statického tlaku pozdĺž potrubia je pomerne náročné a pre väčšinu prípadov aj zbytočné. Vzhľadom na náš problém je možné zanedbať zmenu hustoty plynu (zanedbáva sa expanzia plynu) a ak sa nebude meniť priemer potrubia, zostane konštantná aj rýchlosť plynu. Indexy „s“ používame pre častice (solids) a „g“ pre plyn (gas).

$$\Delta p_{celk} = \Delta p_{g1} + \Delta p_{s1} + \Delta p_{g2} + \Delta p_{s2} + \Delta p_{g3} + \Delta p_{s3} + \Delta p_{s4} \quad (2)$$

Rovnica (2) predstavuje rovnicu tlakového spádu. Prvý a druhý člen na pravej strane rovnice predstavuje tlakový spád vplyvom trenia materiálu a plynu o steny potrubia, tretí a štvrtý člen predstavujú tlakový spád spôsobený urýchlením plynu a materiálu, piaty a šiesty člen je zodpovedný za tlakové straty pri priechode zmesi plynu s časticami cez oblúky a siedmy člen vyjadruje tlakový spád spôsobený zdvihom materiálu (tlakový spád spôsobený zdvihom plynu môžeme zanedbať).

### 4.1 Základné znalosti potrebné k výpočtu

#### 4.1.1 Prúdenie

Pre výpočet tlakovej straty, musíme zaviesť pojem Reynoldsovo číslo  $Re$  (3). Reynoldsovo číslo je bezrozmerná veličina, ktorá nám charakterizuje o aký typ prúdenia sa jedná.

$$Re = \frac{\rho_g w D}{\eta} = \frac{w D}{\nu} \quad (3)$$

V rovnici (3)  $\rho_g$  predstavuje hustotu plynu [ $\text{kg/m}^3$ ],  $w$  je stredná rýchlosť prúdenia plynu v potrubí [ $\text{m/s}$ ],  $D$  je charakteristický rozmer (v našom prípade je to priemer potrubia) [ $\text{m}$ ],  $\eta$  je dynamická viskozita [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] a  $\nu$  je kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Rozoznávame dva základné druhy prúdenia plynu. Prúdenie laminárne a turbulentné. Pri laminárnom prúde je maximálna rýchlosť prúdu väčšia než pri prúde turbulentnom

pri rovnakom hmotnostnom prietoku. Charakteristickou vlastnosťou pri laminárnom prúdení je, že jednotlivé častice sa pohybujú v rovnobežných vrstvách (vláknach), pričom sa ich stav nemení. Vzhľadom k tomu, že v priereze prúdu sú rôzne rýchlosti, predstavujeme si prúd ako zväzok samostatných prúdových vlákien, ktoré po sebe navzájom klžu. Laminárne prúdenie nastáva pri relatívne malých rýchlostiach alebo pri vysokom súčiniteli viskozity tekutiny.

Druhým základným druhom prúdenia je prúdenie turbulentné. Častice pri turbulentnom prúdení okrem svojho postupného pohybu stálou strednou rýchlosťou, konajú súčasne neusporiadaný pohyb aj v inom smere ako je smer postupného prúdu.

Pre vznik turbulentného prúdenia existuje spodná hranica Reynoldsového čísla. Pri prúdení v kruhovej trubici (potrubí) je to  $Re = 2320$  [12]. Pod touto hranicou existuje pri nerušenom prietoku len laminárne prúdenie. Nad touto hodnotou neexistuje okamžité turbulentné prúdenie. Pre potrubia s hladkými vnútornými povrchmi (sklo, mosadz alebo meď) existuje tzv. tranzitná oblasť medzi  $Re = 2320$  a  $Re = 8000$ , kde prúdenie môže byť stále laminárne [12]. Ako sa povrch potrubia stáva drsnejším, prechod medzi laminárnym a turbulentným prúdením sa blíži k nižším hodnotám  $Re$ , ale nikdy neklesne pod hodnotu  $Re = 2320$ . So stúpajúcim  $Re$  vzniká turbulencia najskôr len v niektorých miestach potrubia a neskôr prechádza v úplné turbulentné prúdenie.

#### 4.1.2 Viskozita

Pre nasledovné pochopenie a postupovanie vo výpočte je nutné zaviesť pojem viskozita. Viskozita je vlastnosť všetkých reálnych kvapalín a plynov, ktorá sa prejavuje ako vnútorné trenie počas pohybu. Je možné ju definovať tiež ako mieru zmeny hybnosti kolmo na smer pohybu [12]. Rozlišujeme dva základné druhy viskozity. Dynamickú a kinematickú viskozitu. Vzťah medzi týmito dvoma veličinami je vyjadrený rovnicou (4) [14],

$$\eta = \nu \cdot \rho_g, \quad (4)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita [Pa·s],  $\nu$  kinematická viskozita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] a  $\rho_g$  hustota plynu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Dynamická a kinematická viskozita závisia na charaktere prúdiaceho média. Dynamická viskozita ideálnych plynov je funkciou len teploty a je nezávislá na tlaku. Viskozita vodnej pary a plynov rastie so zvyšujúcou sa teplotou, pričom pri kvapalinách s narastajúcou teplotou klesá. Kinematická viskozita plynov aj kvapalín je funkciou závislou aj na teplote, aj na tlaku. Vzťah medzi viskozitou plynov a teplotou môže byť vyjadrený pomocou Sutherlandovho vzorca (5) [14]

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (5)$$

kde  $\eta$  je dynamická viskozita [Pa·s],  $\eta_0$  dynamická viskozita plynu pri 0 °C [Pa·s],  $T$  teplota [°C] a  $C$  je konštanta závisiaca na druhu plynu [-]. Konštanty pre jednotlivé plyny môžeme dohľadať v [14].

Dynamická viskozita zmesi plynov môže byť určená pomocou vzťahu (6).

$$\eta_{mix} = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{w_i} = \frac{\eta_1}{w_1} + \frac{\eta_2}{w_2} + \dots + \frac{\eta_n}{w_n}, \quad (6)$$

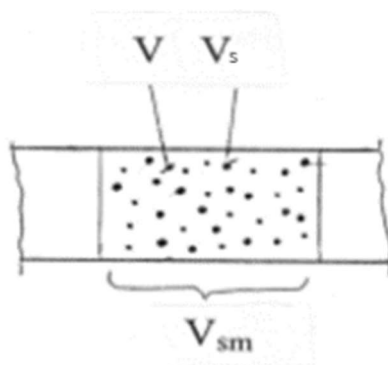
kde  $\eta_{mix}$  predstavuje viskozitu zmesi plynov [Pa·s],  $\eta_i$  je viskozita jednotlivých zložiek [Pa·s] a  $w_i$  sú hmotnostné podiely zložiek zmesi plynu [-].

#### 4.1.3 Pórovitosť $\varepsilon$

Pre lepšie pochopenie pórovitosti nám posluží obr. 8. V určitom okamžiku sa vo vytknutom elemente potrubia nachádza objem materiálu  $V_s$  [m<sup>3</sup>] a objem plynu  $V$  [m<sup>3</sup>], ktorý spoločne tvoria objem zmesi  $V_{sm}$  [m<sup>3</sup>].

Pórovitosť  $\varepsilon$  [-] je definovaná ako pomer

$$\varepsilon = \frac{V}{V + V_s} = \frac{V}{V_{sm}} = 1 - \frac{G_s}{\rho_s \cdot u_s} \quad (7)$$



**Obr. 7** Schematické znázornenie pórovitosti [21]

V rovnici (17)  $G_s$  [kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>] predstavuje hmotnostný tok častíc na m<sup>2</sup>,  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota častíc a  $u_s$  [m/s] je stredná rýchlosť častíc.

#### 4.1.4 Pádová rýchlosť častíc $U_t$

Pre ďalšie pokračovanie vo výpočte je nutné vyjadriť pádovú rýchlosť častíc, ktorá nám je zatiaľ neznáma. Zenz a Othmer zadefinovali bezrozmernú pádovú rýchlosť  $u$  a bezrozmerný priemer častice  $d$  nasledujúcimi vzťahmi:

$$u = \frac{U_t}{w_u} \quad (8)$$

$$d = \frac{d_p}{\delta}, \quad (9)$$

pričom

$$w_u = \left[ \frac{4g\eta_{mix}(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (10)$$

$$\delta = \left[ \frac{4g\rho_g(\rho_s - \rho_g)}{3\eta_{mix}^2} \right]^{-1/3} \quad (11)$$

Vzhľadom na to, že  $w_u$  a  $\delta$  závisia len na hustote častíc, viskozite a hustote plynu, žiadaná pádová rýchlosť môže byť vyjadrená priamo z priemeru častíc, bez vstupných chybných omylov. Po získaní týchto parametrov pádovú rýchlosť častíc vypočítame pomocou vzťahu (12) [20].

$$U_t = w_u \left( \frac{\beta d_p}{\delta} \right)^\alpha, \quad (12)$$

pričom koeficienty  $\alpha, \beta$  obdržíme z tab. 3 [20].

**Tab. 3** Koeficienty pre výpočet pádovej rýchlosti častíc v Newtonských tekutinách [20]

Číslo intervalu	Rozsah $d$	$\alpha$	$\beta$
1	$0 < d < 1,52$	1,988	0,2012
2	$1,52 < d < 2,81$	1,861	0,1862
3	$2,81 < d < 4,42$	1,662	0,1719
4	$4,42 < d < 6,79$	1,433	0,1644
5	$6,79 < d < 10,2$	1,242	0,167
6	$10,2 < d < 17,8$	1,129	0,1757
7	$17,8 < d < 35,3$	0,9919	0,2058

## 4.2 Tlakový spád spôsobený prúdením samostatného plynu

### 4.2.1 Trenie plynu

Z rovnice (13) [12], ktorá je vhodná pre laminárne či turbulentné prúdenie je značné, že tlakové straty sú priamo-úmerné druhej mocnine rýchlosti plynov prúdiacich v potrubí. Nazývame ju Darcy-Weisbachova rovnica.

$$\Delta p_{g1} = \zeta \alpha \frac{\rho_g w^2}{2} \quad (13)$$

V rovnici (13)  $\Delta p_{g1}$  predstavuje tlakovú stratu [Pa],  $\zeta$  stratový súčiniteľ [-],  $\alpha = f(l/D)$  funkčnú závislosť,  $\rho_g$  hustotu plynu [kg/m<sup>3</sup>] a  $w$  je stredná rýchlosť prúdenia plynu v potrubí [m/s].

Avšak, pre prúdenie potrubím môžeme súčiniteľ  $\zeta$  rozpísať ako  $\lambda \frac{l}{D}$ , kde  $\lambda$  zastupuje súčiniteľ trenia [-],  $l$  dĺžku potrubia [m] a  $D$  je vnútorný priemer potrubia [m]. Potom novú rovnicu (14) môžeme prepísať do tvaru:

$$\Delta p_{g1} = \lambda_g \frac{l}{D} \frac{\rho_g w^2}{2} \quad (14)$$

### Trecí koeficient $\lambda_g$

Drsnosť vnútorného povrchu potrubia je dôležitým faktorom. Ak sú použité potrubia s drsným vnútorným povrchom (ťahané oceľové potrubia, liatinové potrubia, zvárané oceľové potrubia...), postupujúci prúd naráža na omnoho väčší odpor ako pri potrubíach s hladkým povrchom. Napriek mnohým pokusom sa doposiaľ nepodarilo vytvoriť všeobecný vzťah medzi tlakovými stratami a drsnosťou povrchu pre plne rozvinuté turbulentné prúdenie v potrubí s drsným povrchom, ktorý by zahŕňal množstvo možné vznikajúcich stavov prúdenia plynu.

Vďaka rôznorodosti používaných materiálov a ich odlišným povrchovým úpravám zavádzame pojem relatívna drsnosť  $\Delta$  [-], ktorá je vyjadrená rovnicou (15) [12].

$$\Delta = \frac{K}{D} \quad (15)$$

Kde  $K$  predstavuje strednú hodnotu nerovností povrchu [mm] a  $D$  je vnútorný priemer potrubia [mm]. Hodnoty pre rôzne materiály a ich povrchové úpravy sú zobrazené v tab. 4.

**Tab. 4** Absolutná drsnost různých materiálů [11]

Materiál	Stav povrchu	K [mm]
Ťahané ocelové potrubie	Nový	0,04 (0,02-0,1)
	Vyčistený po dlhej dobe v prevádzke	0,15-0,20
	Mierne hrdzavý alebo zanesený	$\leq 0,4$
	Ťažko zanesený	$\leq 3,0$
Pozinkovaný ocelový plech	Hladký	0,7
Pozinkované ocelové potrubie	Štandardný	0,15
Zvárané ocelové potrubie	Nový	0,05
	Vyčistený	0,15-0,20
	Mierne zahrdzavený	1-1,5
	Ťažko zahrdzavený	2-4
Liatinové potrubie	Nový	0,26 (až 1)
	Mierne zahrdzavený	0,10-0,15
	Zanesený	1,5-4,0
Nitované ocelové potrubie		0,9 (0,5-10)

**Trecí koeficient  $\lambda_g$  pri laminárnom prúdení**

Pri  $Re$  nižšom ako 2300 nastáva laminárne prúdenie. Hagen-Poiseuillov vzťah, ktorý je popísaný rovnicou (16) [12] je s veľkou presnosťou aplikovateľný na potrubia s hladkým povrchom (sklo, mosadz, meď). Využitie taktiež nájde pri potrubíach s drsným povrchom s obmedzením  $K \leq 0,07$ .

$$\Delta p = \frac{32\eta w l}{D^2}, \quad (16)$$

kde  $\eta$  [Pa.s] je dynamická viskozita,  $w$  [m/s] stredná rýchlosť prúdenia plynu v potrubí,  $l$  [m] dĺžka potrubia a  $D$  [m] priemer potrubia.

Rovnica tlakovej straty môže byť tiež vyjadrená kombináciou rovnice (14) a trecieho koeficientu, ktorý je vyjadrený rovnicou (17) [12].

$$\lambda_g = \frac{64}{Re}, \quad (17)$$

kde  $Re$  [-] predstavuje Reynoldsovo číslo.



**Třetí koeficient  $\lambda_g$  při turbulentním průdení**

Při výpočte součinitele tření při turbulentním průdení hraje důležitou úlohu drsnost potrubia. Jediné povrchy, pro které existují vcelku přesné korelace mezi odporem a součinitelem tření (rovnice 18.1/2/3 [12]) jsou povrchy technicky hladké (sklo, mosadz, měď).

Pro  $Re \sim 3 \cdot 10^3$  až  $1 \cdot 10^5$  můžeme použít Blasiovu rovnici:

$$\lambda_g = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (18.1)$$

Pro  $Re \sim 2 \cdot 10^4$  až  $2 \cdot 10^6$  rovnici Hermannovu:

$$\lambda_g = 0,00540 + \frac{0,3961}{Re^{0,3}} \quad (18.2)$$

Pro  $Re > 1 \cdot 10^6$  vztah odvozený z Prandtl/Kármánové rovnice :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_g}} = -0,8 + 2 \log \left( Re \sqrt{\lambda_g} \right) \quad (18.3)$$

Vztah popisující závislost na relativní drsnosti potrubia, ako aj na  $Re$  nám zjednocuje rovnica (19) [12]. Colebrook a White dokázali popísať tranzitnú oblasť prúdiaceho média medzi prúdením ako nad hladkými, tak aj nad drsnými povrchmi.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_g}} = -2 \log \left[ \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda_g}} + \frac{\Delta}{3,71} \right] \quad (19)$$

Uvedené rovnice popisujú krivky v tzv. Moodyho diagrame (obr. 8).

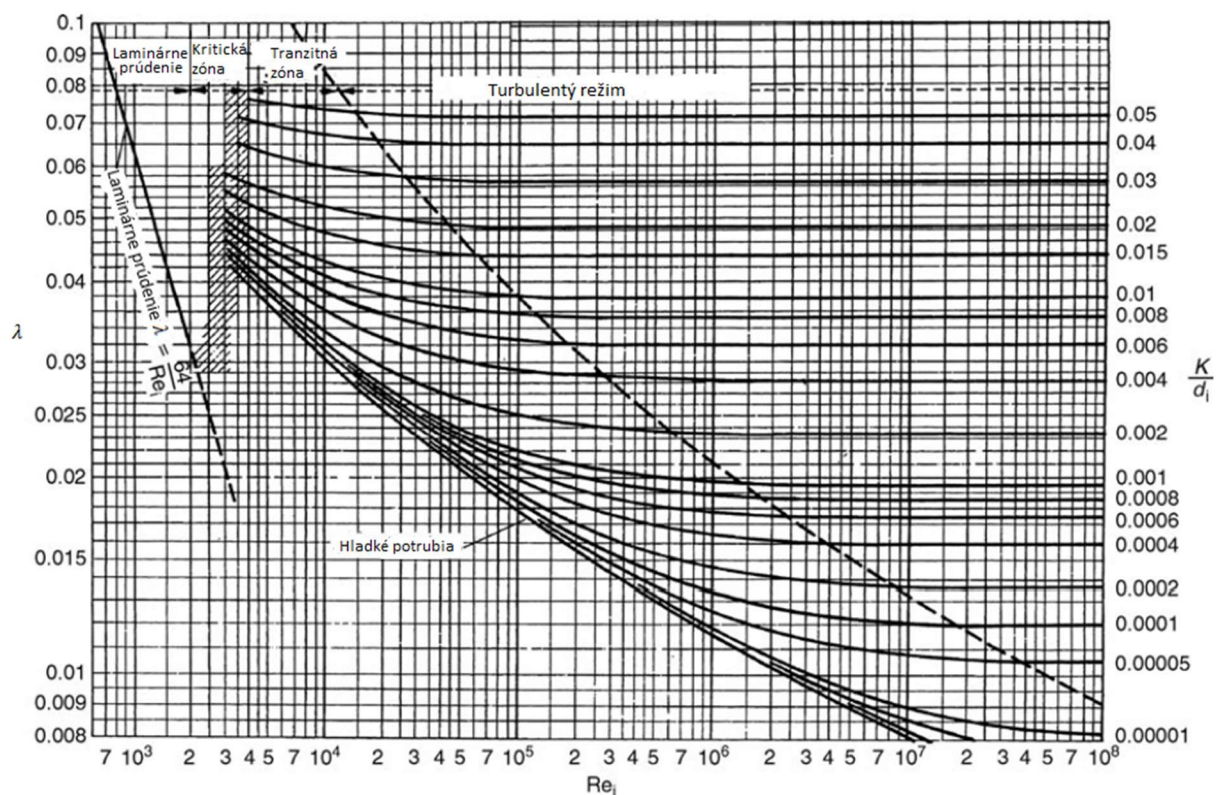
Implicitná Colebrookova rovnica (19) je považovaná za štandardný postup pri výpočte koeficientu tření pokiaľ sa jedná o plne rozvinuté turbulentné prúdenie. Jej nevýhoda spočíva v jej explicitnom vyjadrení. Väčšina modelov nahradzujúcich Colebrookov vztah obsahuje tri logaritmické funkcie a sú z hľadiska dĺžky výpočtu nevhodné. Model navrhnutý Offor Uchechukwu Herbert (Department of Chemical and Petroleum Eng, University of Uyo, Nigeria) [22] obsahuje len dva logaritmy pri dostatočnej presnosti a tým značne zjednodušuje výpočet.

Súčiniteľ trenia  $\lambda_g$  podľa článku [22] vyjadruje rovnica (20).

$$\lambda_g = \left( -2 \log \left( \frac{\Delta}{3,71} + \frac{-1,975}{Re} \left( \ln \left[ \left( \frac{\Delta}{3,93} \right)^{1,092} + \left( \frac{7,627}{Re + 359,9} \right) \right] \right) \right) \right)^{-2} \quad (20)$$

Kde  $\Delta$  [-] predstavuje relatívnu drsnosť a  $Re$  [-] Reynoldsovo číslo.

Všetky predchádzajúce výpočty nám slúžili k tomu, aby sme mohli vypočítať tlakové straty spôsobené trením samostatného plynu v potrubí. Druhá významná zložka, ktorá sa podieľa na výslednej tlakovej strate je spôsobená počiatočným urýchlením plynu.



**Obr. 8** Moodyho diagram slúžiaci ku grafickému určeniu súčiniteľa trenia  $\lambda_g$  [12]

#### 4.2.2 Tlakový spád spôsobený počiatočným urýchlením plynu

Tretí člen (21) rovnice (2) nám posluží pre výpočet počiatočného urýchlenia plynu, ktorý môžeme upraviť na jednoduchú rovnicu (22).

$$\Delta p_{g2} = \varepsilon \rho_g \frac{1}{2} \frac{d(w^2)}{ds} \quad (21)$$

$$\Delta p_{g2} = \varepsilon \rho_g w dw \quad (22)$$

Pretože súčin  $\varepsilon \rho_g$  je konštantný, integráciou nám vyjde nasledujúca rovnica.

$$\Delta p_{g2} = \varepsilon \rho_g \frac{w^2}{2}. \quad (23)$$

V rovnici (23)  $\Delta p_{g2}$  [Pa] predstavuje tlakovú stratu spôsobenú urýchlením plynu a  $\varepsilon$  [-] pórovitosti.

### 4.2.3 Tlakový spád plynu spôsobený miestnymi odpormi

Najbežnejším miestnym odporom v potrubí je oblúk. Stratové súčinitele oblúku sú dobre preskúmané a uvádzajú sa v množstve vzduchotechnických publikáciách. Tlakovú stratu vyjadríme jednoduchým vzťahom:

$$\Delta p_{g3} = \sum \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \rho_g, \quad (24)$$

kde  $\sum \zeta$  [-] je súčet jednotlivých stratových súčiniteľov  $\zeta$  pri priechoode oblúkom. Tab. 5 nám zobrazuje hodnoty  $\zeta$  pre konkrétne situácie. Medzihodnoty môžeme stanoviť interpoláciou.

**Tab. 5** Stratový súčiniteľ  $\zeta$  oblúku [17]

Stredový uhol $\theta$	Pomer polomeru krivosti oblúku k priemeru R/D						
	1	1,5	2	2,5	3	6	10
7,5	0,028	0,021	0,018	0,016	0,014	0,01	0,008
15	0,058	0,044	0,037	0,033	0,029	0,021	0,016
30	0,11	0,081	0,069	0,061	0,054	0,038	0,03
60	0,18	0,14	0,12	0,1	0,091	0,064	0,051
90	0,23	0,18	0,15	0,13	0,12	0,083	0,066
120	0,27	0,2	0,17	0,15	0,13	0,1	0,076
150	0,3	0,22	0,19	0,17	0,15	0,11	0,084
180	0,33	0,25	0,21	0,18	0,16	0,12	0,092

## 4.3 Tlakový spád spôsobený prítomnosťou častíc

### 4.3.1 Trenie materiálu

Rovnica (2) pre tlakový spád spôsobený trením materiálu nadobúda tvaru

$$\Delta p_{s1} = 2\lambda_s \rho_s (1 - \varepsilon) u_s^2 \frac{l}{D}. \quad (25)$$

V rovnici (25) [19]  $u_s$  [m/s] predstavuje strednú rýchlosť častíc,  $\lambda_s$  [-] súčiniteľ trenia častíc a zvyšné premenné sú nám známe.

Výskyt častíc v prúdiacom plyne pre nás predstavuje určitú výzvu. Tieto častice sa v potrubí nenachádzajú stacionárne, ale sú neustále uvádzané do pohybu pomocou plynu. To spôsobuje, že nastáva prídavné trenie medzi jednotlivými časticami a časticami so stenou potrubia. Naším cieľom je zabrániť možnému vzniku usadzovania častíc na stenách potrubia. Kľúčovým parametrom bude zistiť sedimentačnú rýchlosť  $u_{salt}$  [m/s], pod ktorú by sme sa nemali dostať, aby sme predišli možným komplikáciám. Empirický vzťah pre sedimentačnú rýchlosť nám popisuje napr. Rizk rovnicou (26) [19]:

$$u_{salt} = \left( \frac{4M_s 10^{a_1} g^{b_1/2} D^{\frac{b_1}{2}-2}}{\rho_g \pi} \right)^{1/(b_1+1)}, \quad (26)$$

kde  $M_s$  [kg/s] je hmotnostný tok častíc,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] gravitačné zrýchlenie,  $D$  [m] priemer potrubia,  $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota plynu.  $a_1$ ,  $b_1$  [-] sú konštanty vyjadrené vzťahmi (27, 28) [19], kde  $d_p$  [m] predstavuje veľkosť častíc.

$$a_1 = 1440d_p + 1,96 \quad (27)$$

$$b_1 = 1100d_p + 2,5 \quad (28)$$

Ďalšiu nevyhnutnú rýchlosť, rýchlosť častíc  $u_s$  [m/s], obdržíme z rovnice (29) [19].

$$u_s = w(1 - 0,0638 \cdot d_p^{0,3} \rho_s^{0,5}) \quad (29)$$

### Trecí koeficient $\lambda_s$

Trecí koeficient  $\lambda_s$  použitý v rovnici (25) závisí na umiestnení potrubia. Pre horizontálne uložené potrubie  $\lambda_s$  nadobúda nasledujúci tvar [23].

$$\lambda_{s,Barth} = 0,005 \frac{1 - Fr_D^{-1}}{1 + 0,00125(Fr_{D,\infty})^2} \quad (30.1)$$

Pre vertikálne uloženie musí byť upravený do nasledujúcej formy [19].

$$\lambda_s = \frac{0,057 D}{2} \frac{\sqrt{g}}{u_s} \quad (30.2)$$

V predchádzajúcich rovniciach (30.1/2) je  $Fr_D$  [-] je Froudove číslo,  $Fr_{D,\infty}$  taktiež predstavuje Froudove číslo [-], ale vzťahujeme ho k pádovej rýchlosti častíc.  $D$  [m] je priemer potrubia,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] gravitačné zrýchlenie,  $u_s$  [m/s] rýchlosť častíc.

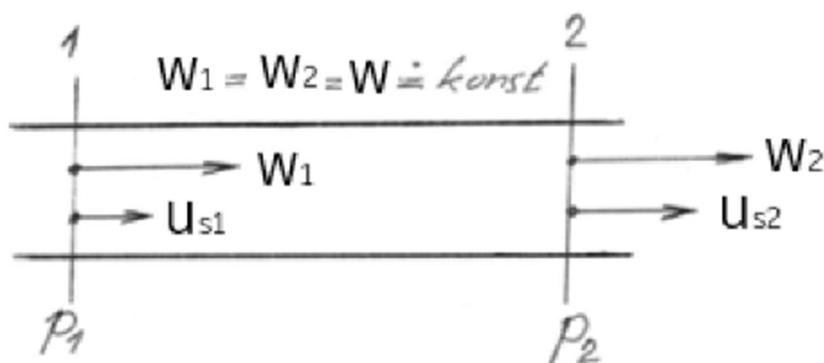
$$Fr_{D,i} = \frac{u_i}{\sqrt{Dg}} \quad (31)$$

V rovnici (31)  $u_i$  [m/s] značí rýchlosť, ku ktorej vzťahujeme  $Fr_D$ .

V tomto momente sú nám známe všetky premenné a môžeme vypočítať tlakový spád spôsobený trením častíc v prúdiacom plyne.

#### 4.3.2 Tlakový spád spôsobený počiatočným urýchlením častíc

Pre praktické využitie výpočtu tlakovej straty nás zaujíma aj strata vplyvom urýchlenia materiálu. Táto situácia je schematicky znázornená na obr. 9. V praxi pri podtlaku v potrubí tento prípad nastáva za miestom podávania častíc alebo za oblúkom, kde sa vplyvom trenia častíc o stenu potrubia rýchlosť prúdenia častíc spomalí. Pri výpočte na danom úseku budeme predpokladať, že  $w_1 = w_2 = w = konst.$



**Obr. 9** Tlaková strata urýchlením materiálu [21] (upravený)

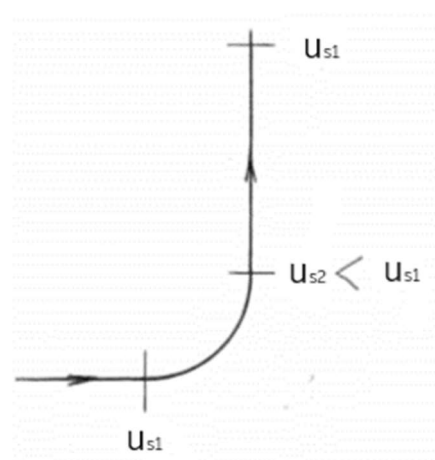
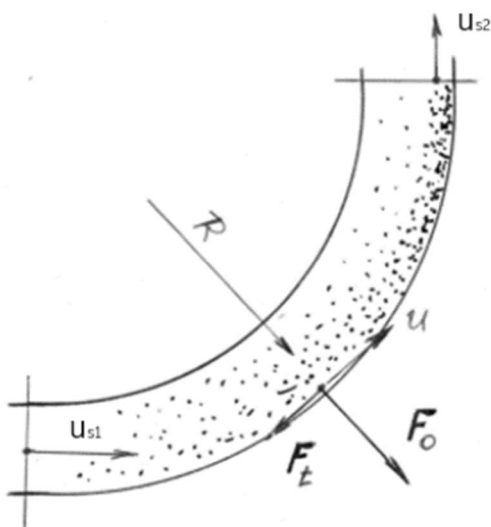
S týmito predpokladmi jednoducho môžeme vypočítať tlakové straty podľa rovnice (32) [19].

$$\Delta p_{s2} = 0,5(\rho_s(1 - \varepsilon)u_s^2) \quad (32)$$

### 4.3.3 Tlaková strata pri priechode materiálu oblúkom

Ako je znázornené na obr. 10 častice sa pred oblúkom nachádzajú vo vznesenom stave. Pri priechode oblúkom sa vplyvom odstredivej sily ich rýchlosť spomalí.

Na obr. 11 môžeme vidieť, že v oblúku dochádza k spomaleniu častice a k hlavnému poklesu tlaku dôjde až za oblúkom, kde materiál musí zas dosiahnuť pôvodnú rýchlosť. Tlakovú stratu pri priechode oblúkom môžeme preto približne vyjadriť ako tlakovú stratu spôsobenú urýchlením častíc.



**Obr. 10** Priebeh materiálu oblúkom [21]

**Obr. 11** Priebeh rýchlostí častíc [22]

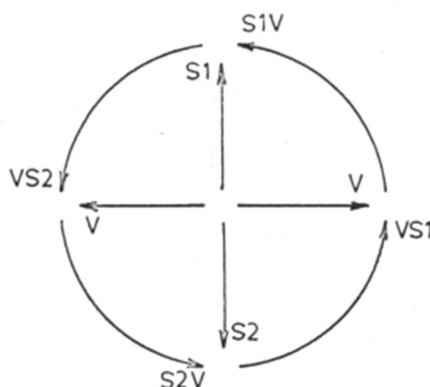
Tlakovú stratu pri priechode materiálu všetkými oblúkmi môžeme vyjadriť ako

$$\Delta p_{s3} \cong \sum \zeta_{obl} \cdot \mu \frac{w^2}{2} \rho_g \cdot \quad (33)$$

Vzhľadom na komplikované vyjadrenie jednotlivých hodnôt stratového súčiniteľa  $\zeta_{obl}$  uvádza Vávra v [17] nasledujúci zjednodušený vzťah:

$$\Delta p_{s3} \cong \mu \frac{w^2}{2} \rho_g \sum \gamma \zeta, \quad (34)$$

kde  $\mu$  [-] značí hmotnostný zmiešavací pomer,  $\gamma$  [-] súčiniteľ polohy oblúku a  $\zeta$  [-] stratový súčiniteľ pri priechode oblúkom plynom (tab. 5). Súčiniteľ polohy oblúku  $\gamma$  nadobúda len dvoch hodnôt, a to  $\gamma = 4$  pre najmenej priaznivú polohu VS1 (podľa obr. 12) a  $\gamma = 1$  pre všetky ostatné polohy oblúku.



Obr. 12 Označenie polohy oblúku [18]

#### 4.3.4 Tlaková strata zdvihom častíc

Pri prúdení zmesi plynu s časticami vertikálnym potrubím budeme predpokladať, že na danom úseku sa zanedbáva strata trením častíc a plynu a zanedbáva sa aj urýchlenie plynu s časticami.

Tlakovú stratu potom vypočítame vzťahom (35) [19].

$$\Delta p_{s4} = \sum \rho_s (1 - \varepsilon) g \cdot l_i \cdot \sin(\varphi) \quad (35)$$

V rovnici (35)  $l_s$  [m] predstavuje dĺžku potrubia pri prislúchajúcich sklonoch a  $\varphi$  [°] predstavuje uhol sklonu potrubia od vodorovnej osi. To znamená, že pre horizontálne potrubie  $\sin(\varphi) = 0$  a pre vertikálne uložené potrubie  $\sin(\varphi) = 1$ .

**Tab. 6** Prehľad všetkých vzťahov na výpočet tlakovej straty

	zložka tlakovej straty	čistý plyn (g)	častice (s)
1	trenie	$\Delta p_{g1} = \lambda_g \frac{l}{D} \frac{\rho w^2}{2}$	$\Delta p_{s1} = 2\lambda_s \rho_s (1 - \varepsilon) u_s^2 \frac{l}{D}$
2	počiatočné urýchlenie	$\Delta p_{g2} = \varepsilon \rho_g \frac{w^2}{2}$	$\Delta p_{s2} = 0,5(\rho_s (1 - \varepsilon) u_s^2)$
3	miestne straty	$\Delta p_{g3} = \sum \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \rho_g$	$\Delta p_{s3} \cong \mu \frac{w^2}{2} \rho_g \sum \gamma \zeta$
4	zdvih	0	$\Delta p_{s4} = \sum \rho_s (1 - \varepsilon) g \cdot l_s \cdot \sin(\varphi)$

## 5. Praktická část

Jedným z cieľov prezentovanej bakalárskej práce je zamerať sa na výpočet a zhodnotenie tlakových strát v potrubí cementárne spôsobených zanášaním. Vyhodnotením tlakových strát sme schopní zistiť, prípadne vhodne a optimálne nastaviť podmienky prevládajúce v potrubí (rýchlosť prúdenia, hmotnostný tok častíc, prietok spalín...). S týmito predpokladmi je možné predvídať zanášanie v potrubí a môžeme to včas a efektívne riešiť. Pre názornosť uvediem dva výpočty tlakových strát pre rôzne konfigurácie potrubného systému.

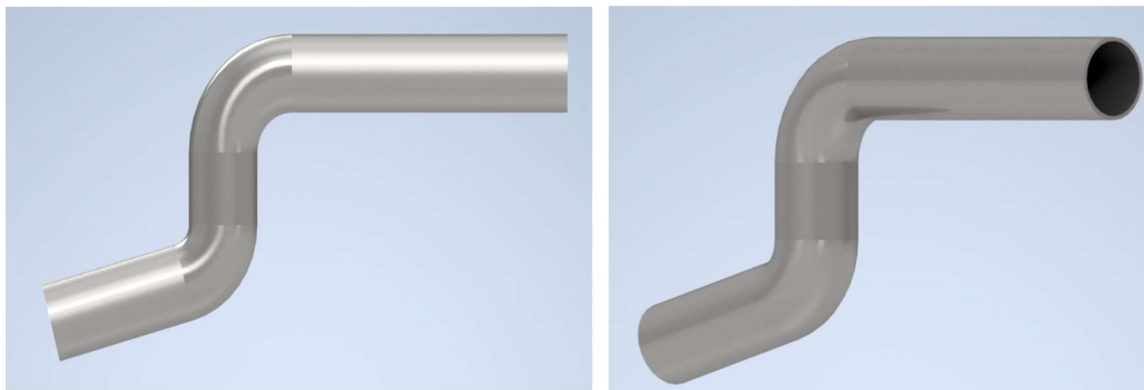
### 5.1 Prvá konfigurácia potrubného systému (A)

Tab. 7 Vstupné parametre A

Parametre			
Prevádzková teplota $T_f$		120°C	
Tlak v potrubí $p_f$		99625 Pa	
Prietok spalín vo vlhkom stave $\dot{V}_n$		240000 m³N/h	
Hmotnostný tok častíc $M_s$		55000 kg/h	
Zloženie a vlastnosti spalín			
Vlhkosť $\phi_s$		130 g/m³N	
Objemové % O₂ v suchom stave		7,7%	
Objemové % CO2 v suchom stave		21,8%	
Objemové % N₂ v suchom stave		70,5%	
Častice			
Hustota častice $\rho_s$		1700 kg/m³	
Priemerná veľkosť $d_p$		22,004 μm	
Vlastnosti potrubia			
Priemer potrubia $D$		2000 mm	
Dĺžka potrubia (horizontálna) $l_h$		8 m	
Dĺžka potrubia (vertikálna) $l_v$		2 m	
Sklon potrubia $\varphi$		15°	
Dĺžka potrubia (pod sklonom $\varphi$ ) $l_s$		4 m	
Miestne straty			
Oblúky	Polomer krivosti $r_o$	Stredový uhol $\phi$	Poloha oblúku*
Oblúk 1	3000 mm	105°	VS1
Oblúk 2	4000 mm	90°	iná
Normálové podmienky			
Normálová teplota $T_n$		0°C	
Normálový tlak $p_n$		101325 Pa	

\*pre polohu oblúku pozri obr. 12 („iná“ voči polohe VS1)





**Obr. 13** Schematické zobrazenie možnej potrubnej trasy

### 5.1.1 Vlastnosti prúdiaceho plynu

Zloženie spalín bolo zadané v objemových percentách v suchom stave a vlhkosť bola vyjadrená pomocou hmotnosti. Hodnoty sú zobrazené v tab. 7. Pre nasledujúce výpočty bolo nutné prepočítať vlastnosti prúdiaceho média pri podmienkach existujúcich v potrubí. Vlastnosti suchých aj mokrých spalín sú zobrazené v tabuľkách 8, 9. Získali sme ich jednoduchými výpočtami, ktoré sú popísané rovnicami (36, 37 a 38).

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_m}, \quad (36)$$

kde  $\rho_i$  [kg/m<sup>3</sup>] predstavuje hustotu zložky zmesi,  $M_i$  [kg/mol] je molárna hmotnosť zložky a  $V_m$  [m<sup>3</sup>/mol] je molárna objemová konštanta.  $V_m = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ .

$$m_i = \rho_i x_i, \quad (37)$$

kde  $m_i$  [kg/m<sup>3</sup>] je hmotnosť zložky zmesi a  $x_i$  [-] je objemový zlomok zmesi.

$$w_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i}, \quad (38)$$

kde  $w_i$  [-] je hmotnostný zlomok zmesi.

**Tab. 8** Vlastnosti suchých spalín

Suché spaliny	obj. % x	hm. % w	hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]
N <sub>2</sub>	70,5	62,1	0,881
CO <sub>2</sub>	21,8	30,2	0,428
O <sub>2</sub>	7,7	7,7	0,11
Σ	100	100	1,419

**Tab. 9** Vlastnosti skutočných (mokrých) spalín v potrubí

Mokrýe spaliny	hm. % w	hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]
N <sub>2</sub>	56,9	0,881
CO <sub>2</sub>	27,6	0,428
O <sub>2</sub>	7,1	0,11
Vodné pary	8,4	0,13
Σ	100	1,549

Potom sme podľa vzťahu (39) vypočítali špecifickú plynovú konštantu  $r$  [J/kg·K].

$$r = R_m \sum_i \frac{w_i}{M_i}, \quad (39)$$

kde  $R_m$  je univerzálna plynová konštanta.  $R_m = 8,3143$  [J/mol·K].

Nasledovne sme mali všetky potrebné hodnoty pre výpočet hustoty prúdiaceho média. Spaliny uvažujeme ako zmes ideálnych plynov a pri výpočtoch budeme vychádzať zo stavovej rovnice pretože je to pre prezentovanú prácu postačujúce.

Ostávajúce veličiny (kinematická a dynamická viskozita,  $Re$ ) sme získali postupom, ktorý je uvedený v kapitole 4.1.1 a 4.1.2.

Tab. 10 uvádza súhrn procesných parametrov spalín, ktoré sú nevyhnutné na vyčíslenie tlakovej straty. Všetky vypočítané parametre sme získali postupom uvedením v kapitole 4 a exaktné výpočty sú uvedené v prílohe prezentovanej bakalárskej práce.

### 5.1.2 Výpočet tlakovej straty

Celkovú tlakovú stratu vypočítame podľa rovnice (2), kde najskôr budeme podľa princípu aditívnosti počítať tlakovú stratu spôsobenú prúdením čistého plynu a potom k nej pripočítame straty spôsobené výskytom častíc v plyne.

**Tab. 10** Procesné parametre

Vypočítané parametre	Značka	Jednotka	Hodnota
Hustota plynu	$\rho_g$	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,911
Kinematická viskozita	$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	$2,1778 \cdot 10^{-4}$
Hmotnostný tok plynu	$\dot{m}_g$	[kg/s]	88,891
Prierez	S	[m <sup>2</sup> ]	3,142
Objemový prietok	$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	97,592
Hmotnostný tok častíc na m <sup>2</sup>	$G_s$	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	4,863
Hmotnostný zmiešavací pomer	$\mu$	[-]	0,172
Pórovitosť	$\varepsilon$	[-]	0,999897
Reynoldsove číslo	Re	[-]	$2,854 \cdot 10^5$
Froudove číslo ( $f(w)$ )	$Fr_D$	[-]	49,201
Froudove číslo ( $f(U_t)$ )	$Fr_{D,\infty}$	[-]	$2,664 \cdot 10^{-7}$
<b>Rýchlosti</b>			
Stredná rýchlosť prúdenia plynu	w	[m/s]	31,064
Stredná rýchlosť častíc	$u_s$	[m/s]	27,791
Sedimentačná rýchlosť	$u_{salt}$	[m/s]	17,158
Pádová rýchlosť častíc	$U_t$	[m/s]	2,286
Minimálna prevádzková rýchlosť *	$U_0$	[m/s]	25,737
<b>Trecie koeficienty</b>			
Pre plyn	$\lambda_g$	[-]	0,015
Horizontálne, naklonené potrubie	$\lambda_{s,Barth}$	[-]	0,0045
Vertikálne potrubie	$\lambda_{s,v}$	[-]	0,0049

\* Minimálna prevádzková rýchlosť je podľa [19] odporúčaná aspoň  $1,5u_{salt}$ .

### Trenie plynu

Tlaková strata na uvedenej dĺžke bola vypočítaná podľa vzťahu (14). Zatiaľ sme uvažovali, že v potrubí prúdi samostatný plyn a potrubie je hladké. Trecí koeficient  $\lambda_g$  bol vypočítaný podľa vzťahu (18.2).

$$\Delta p_{g1} = \lambda_g \frac{l}{D} \frac{\rho_g w^2}{2} \quad (14)$$

**Tab. 11** Tlaková strata spôsobená trením plynu pre rovné potrubie bez častíc

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata	$\Delta p_{g1}$	[Pa]	44,767

**Počiatkové urýchlenie plynu**

Pre výpočet použijeme vzťah (23). Keďže v našom prípade uvažujeme len určitý úsek potrubného systému, túto hodnotu do celkovej tlakovej straty nezapočítavame.

$$\Delta p_{g2} = \varepsilon \rho_g \frac{w^2}{2}. \quad (23)$$

**Tab. 12** Tlaková strata spôsobená počiatkovým urýchlením plynu

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata	$\Delta p_{g2}$	[Pa]	

**Miestne straty**

$$\Delta p_{g3} = \sum \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \rho_g, \quad (24)$$

Stratový súčiniteľ  $\zeta$  nájdeme v tabuľke 5. Medzihodnoty môžeme interpolovať.

**Tab. 13** Tlaková strata spôsobená priechodom plynu cez oblúky

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata	$\Delta p_{g3}$	[Pa]	149,424

**Tlaková strata spôsobená trením častíc**

Pri počítaní tlakovej straty ovplyvnenej výskytom častíc v plyne a následným trením, berieme do úvahy či trenie nastáva v horizontálnom alebo vertikálnom potrubí. V rovnici (25) sa to prejaví rôznymi trecími koeficientami (rovnice (30.1) a (30.2)). Pre naklonené potrubie použijeme rovnaký vzorec pre trecí koeficient ako v prípade pri horizontálnom uložení potrubia. V našom prípade sú rozdiely minimálne, to je spôsobené nízkou koncentráciou častíc v plyne.

$$\Delta p_{s1} = 2\lambda_s \rho_s (1 - \varepsilon) u_s^2 \frac{l_i}{D} \quad (25)$$

**Tab. 14** Tlaková strata spôsobená trením častíc

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata – (horizontálna, naklonená časť)	$\Delta p_{s1,h}$	[Pa]	7,944
Tlaková strata - vertikálna	$\Delta p_{s1,v}$	[Pa]	1,228

**Tlaková strata spôsobená počiatčným urýchlením častíc**

Opäť nastáva prípad, kedy nepripočítavame tlakovú stratu spôsobenú počiatčným urýchlením častíc, pretože častice sú už v ustálenom stave (v pohybe).

$$\Delta p_{s2} = 0,5(\rho_s(1 - \varepsilon)u_s^2) \quad (32)$$

**Tab. 15** Tlaková strata spôsobená urýchlením častíc

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata	$\Delta p_{s2}$	[Pa]	

**Tlaková strata pri priechode materiálu oblúkmi**

$$\Delta p_{s3} \cong \mu \frac{w^2}{2} \rho_g \sum \gamma \zeta \quad (34)$$

Ako už bolo spomenuté v kap. 4.3.3  $\gamma$  závisí na polohe oblúku (možné polohy obr. 12) a stratový súčiniteľ  $\zeta$  nájdeme v tab. 5.

**Tab. 16** Tlaková strata spôsobená priechodom častíc oblúkmi

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata	$\Delta p_{s3}$	[Pa]	68,736

**Tlaková strata zdvihom častíc**

$$\Delta p_{s4} = \sum \rho_s(1 - \varepsilon)g \cdot l_i \cdot \sin(\varphi) \quad (35)$$

**Tab. 17** Tlaková strata spôsobená zdvihom častíc

Parameter	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlaková strata	$\Delta p_{s4}$	[Pa]	7,532

**Celková tlaková strata**

V nasledujúcej tabuľke (tab. 18) sú pre prehľadnosť uvedené všetky vypočítané hodnoty a takisto je uvedená celková tlaková strata.

**Tab. 18** Celková tlaková strata A

Tlaková strata	Značka	Jednotka	Hodnota
Trenie plynu	$\Delta p_{g1}$	[Pa]	44,767
Oblúky (plyn)	$\Delta p_{g3}$	[Pa]	149,424
Trenie častíc (horizontálne, naklonené)	$\Delta p_{s1,h}$	[Pa]	7,944
Trenie častíc (vertikálne)	$\Delta p_{s1,v}$	[Pa]	1,228
Oblúky (častice)	$\Delta p_{s3}$	[Pa]	68,736
Zdvih častíc	$\Delta p_{s4}$	[Pa]	7,532
<b>Celková tlaková strata</b>	$\Delta p_{celk}$	[Pa]	279,631

\*nezapočítava s počiatočným urýchlením (riešime len časť, úsek potrubného systému)

## 5.2 Druhá konfigurácia potrubného systému (B)

Obr. 14 zobrazuje možnú konfiguráciu potrubného systému. Smer prúdenia plynu s časticami predpokladáme z pravej strany. Uvedená informácia je potrebná pre správne určenie polohy oblúkov.

Oproti konfigurácií prvého potrubného systému sa nám zmenila geometria, prietok spalín (vlhký stav), hmotnostný tok častíc. Zvyšné parametre ostali ekvivalentné a výpočet sme vykonali analogicky (exaktné riešenie sa nachádza v prílohe).

**Obr. 14** Schematické zobrazenie potrubia B

Tab. 19 Vstupné parametre B

Parametre			
Prevádzková teplota $T_f$		120°C	
Tlak v potrubí $p_f$		99625 Pa	
Prietok spalín vo vlhkom stave $\dot{V}_n$		300000 m³N/h	
Hmotnostný tok častíc $M_s$		60000 kg/h	
Zloženie a vlastnosti spalín			
Vlhkosť $\phi_s$		130 g/m³N	
Objemové % O <sub>2</sub> v suchom stave		7,7%	
Objemové % CO2 v suchom stave		21,8%	
Objemové % N <sub>2</sub> v suchom stave		70,5%	
Častice			
Hustota častice $\rho_s$		1700 kg/m³	
Priemerná veľkosť $d_p$		22,004 μm	
Vlastnosti potrubia			
Priemer potrubia $D$		2000 mm	
Dĺžka potrubia (horizontálna) $l_h$		7 m	
Dĺžka potrubia (vertikálna) $l_v$		4 m	
Sklon potrubia $\varphi$		0°	
Dĺžka potrubia (pod sklonom $\varphi$ ) $l_s$		0 m	
Miestne straty			
Oblúky	Polomer krivosti $r_o$	Stredový uhol $\phi$	Poloha oblúku*
Oblúk 1	4000 mm	90°	iná
Oblúk 2	4000 mm	90°	VS1
Normálové podmienky			
Normálová teplota $T_n$		0°C	
Normálový tlak $p_n$		101325 Pa	

\*pre polohu oblúku pozri obr. 12 („iná“ voči polohe VS1)

Tab. 20 Procesné parametre

Vypočítané parametre	Značka	Jednotka	Hodnota
Hustota plynu	$\rho_g$	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,911
Kinematická viskozita	$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	$2,1771 \cdot 10^{-4}$
Hmotnostný tok plynu	$\dot{m}_g$	[kg/s]	111,113
Prierez	S	[m <sup>2</sup> ]	3,142
Objemový prietok	$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	97,592
Hmotnostný tok častíc na m <sup>2</sup>	$G_s$	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	5,305
Hmotnostný zmiešavací pomer	$\mu$	[-]	0,15
Pórovitosť	$\varepsilon$	[-]	0,99991
Reynoldsove číslo	Re	[-]	$3,567 \cdot 10^5$
Froudove číslo ( $f(w)$ )	$Fr_D$	[-]	76,877
Froudove číslo ( $f(U_t)$ )	$Fr_{D,\infty}$	[-]	$2,664 \cdot 10^{-7}$
<b>Rýchlosti</b>			
Stredná rýchlosť prúdenia plynu	w	[m/s]	38,831
Stredná rýchlosť častíc	$u_s$	[m/s]	34,738
Sedimentačná rýchlosť	$u_{salt}$	[m/s]	17,587
Pádová rýchlosť častíc	$U_t$	[m/s]	2,286
Minimálna prevádzková rýchlosť *	$U_0$	[m/s]	26,38
<b>Trecie koeficienty</b>			
Pre plyn	$\lambda_g$	[-]	0,014
Horizontálne potrubie	$\lambda_{s,Barth}$	[-]	0,0049
Vertikálne potrubie	$\lambda_{s,v}$	[-]	0,0036

\* Minimálna prevádzková rýchlosť je podľa [19] odporúčaná aspoň  $1,5u_{salt}$ .

Tab. 21 Celková tlaková strata B

Tlaková strata	Značka	Jednotka	Hodnota
Trenie plynu	$\Delta p_{g1}$	[Pa]	52,721
Oblúky (plyn)	$\Delta p_{g3}$	[Pa]	206,007
Trenie častíc (horizontálne, naklonené)	$\Delta p_{s1,h}$	[Pa]	6,366
Trenie častíc (vertikálne)	$\Delta p_{s1,v}$	[Pa]	2,678
Oblúky (častice)	$\Delta p_{s3}$	[Pa]	77,251
Zdvih častíc	$\Delta p_{s4}$	[Pa]	5,356
<b>Celková tlaková strata</b>	$\Delta p_{celk}$	[Pa]	350,379

\*nezapočítava s počiatočným urýchlením (riešime len určitú časť, úsek potrubného systému)

Pomocou dvoch predchádzajúcich výpočtov je zrejmé a jednoduchšie pre pochopenie, kde v potrubnom systéme väčšinou dochádza k najväčším tlakovým stratám. Najväčšie



straty nastávajú pri počiatocnom urýchlení plynu s časticami, ktoré ale momentálne nie sú podstatné. Nezanedbateľný vplyv predstavuje aj akcelerácia častíc s plynom po priechode tvarovým prvkom, ako je napríklad oblúk. Pre najvyššiu efektivitu spotreby energie spalínových ventilátorov by sme sa mali snažiť vyvarovať zbytočne komplikovanej geometrii potrubného systému.

### 5.3 Predpripravený výpočtový model v Exceli

#### 5.3.1 Možnosti modelu

Uvedomovanie si dôležitosti geometrie potrubného systému a jej dopad hlavne na ekonomické aspekty, je len jedným z viacerých kritérií, ktoré ovplyvňujú výslednú tlakovú stratu. Ďalšou možnosťou pre zefektívnenie celého procesu je vhodné a optimálne nastavenie systému (rýchlosť prúdenia v potrubí, regulácia množstva prúdiacich častíc...). Keďže by „manuálne“ počítanie výslednej tlakovej straty pri rôznych podmienkach bolo zbytočne zdĺhavé, bol pripravený čiastočne automatizovaný program v Exceli, ktorý je súčasťou tejto bakalárskej práce.

Do predpripraveného programu je potrebné zadať vstupné parametre (zloženie spalín, geometria potrubia, prevádzkové parametre...). Bez ďalšej interakcie s programom vždy obdržíme výsledné tlakové straty spôsobené jednotlivými zložkami (trenie plynu, trenie častíc, zdvih častíc...) a celkovú tlakovú stratu, poprípade výstražnú informáciu o upchatí potrubia (obr. 17). Potreba znalosti tlakovej straty je pre nás esenciálna pre vyhodnotenie energetických nákladov.

Keďže prezentovaná bakalárska práca je zameraná na zanášanie potrubia, v spomenutom programe získame okrem tlakových strát aj údaje o maximálnej veľkosti usadzovaných častíc (obr. 15). To predstavuje pomerne zaujímavú informáciu, keďže vďaka tomuto sme schopní predčasne zabrániť možnému usadzovaniu častíc. Jednoducho do programu zadáme parametre, pri ktorých by sme chceli prevádzkovať potrubný systém v cementárni a obdržíme maximálnu veľkosť usadzovaných častíc pri zadaných podmienkach. Následne to môžeme porovnať so skutočnou veľkosťou častíc, ktoré pri spaľovaní vznikajú. Ak bude programom vypočítaná hodnota častíc menšia ako tá skutočná, k usadzovaniu dochádzať nebude. Ak bude väčšia, budeme sa snažiť podmienky pomocou programu optimalizovať až kým celkovo sedimentácií nezabráňime.

Ak by k usadzovaniu častíc dochádzalo model dokáže spočítať medzný priemer (aj prierez), kedy nastane v potrubí rovnováha a usadzovanie častíc prestane (obr. 16). Výpočet je založený na princípe kontinuity. Pričom vieme, že pri usadzovaní sa priemer potrubia znižuje a rýchlosť sa tým pádom musí zväčšovať. Zo získanej informácie o zanášaní z výpočtového modelu vieme posúdiť, či zanášanie je minimálne a je akceptovateľné alebo vzniknutý problém je nutné riešiť.

**Prístup 1. (výpočet veľkosti usadzovaných častíc)**

Výsledky	Značka	Jednotky	Hodnoty
Veľkosť usadzovaných častíc	$d_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	1550.895
Prierez potrubia (nezanesený, čistý)	S	[ $\text{m}^2$ ]	3.142
Zhodnotenie			
Všetky častice, ktoré sú väčšie ako $d_p$ budú pri aktuálnych parametroch podliehať sedimentácii.			

Obr. 15 Možnosť práce s programom („prístup 1.“)

**Prístup 2. (výpočet medzného prierezu pri známej max. veľkosti častíc)**

Vstupné parametry	Značka	Jednotky	Hodnoty
Max. veľkosť častíc	$d_{p,max}$	[ $\mu\text{m}$ ]	1000
Výsledky			
Medzný priemer	$D_{medz}$	[mm]	1746.897
Medzný prierez	$S_{medz}$	[ $\text{m}^2$ ]	2.397
Zhodnotenie			
Pri max. veľkosti častíc $d_{p,max}$ nastane rovnováha pri priereze $S_{medz}$ , ktorý sa viac už nebude zmenšovať (už viac nenastáva sedimentácia).			

Obr. 16 Možnosť práce s programom („prístup 2.“)

Tlakové straty							
Plyn	Značka	Jednotky	Hodnoty	Častice	Značka	Jednotky	Hodnoty
Trenie čistého plynu	$\Delta p_{t1}$	[Pa]	13387.204	Trenie spôsobené prítomnosťou častíc (horizontálne)	$\Delta p_{t1,h}$	[Pa]	#HODNOTA!
Počiatočné urýchlenie plynu	$\Delta p_{t2}$	[Pa]	#HODNOTA!	Trenie spôsobené prítomnosťou častíc (vertikálne)	$\Delta p_{t1,v}$	[Pa]	#HODNOTA!
Miestne straty pri priechode oblúkom	$\Delta p_{t3}$	[Pa]	68.859	Počiatočné urýchlenie častíc	$\Delta p_{t2}$	[Pa]	#HODNOTA!
Zdvih	$\Delta p_{t4}$	[Pa]	0	Miestne straty	$\Delta p_{t3}$	[Pa]	284038.798
				Zdvih	$\Delta p_{t4}$	[Pa]	#HODNOTA!
Celková tlaková strata pri aktuálne zvolených vstupoch (celého systému)						[Pa]	#HODNOTA!
Tlaková strata pre určitý úsek potrubia (nepočíta s počiatočným urýchlením častíc s plynom)						[Pa]	#HODNOTA!

POZOR! DOŠLO K ABSOLÚTNEMU UPCHATIU POTRUBIA!

Obr. 17 Vyhodnocovanie stavu potrubia

**5.3.2 „Odchýlky“ spôsobené samostatnosťou modelu**

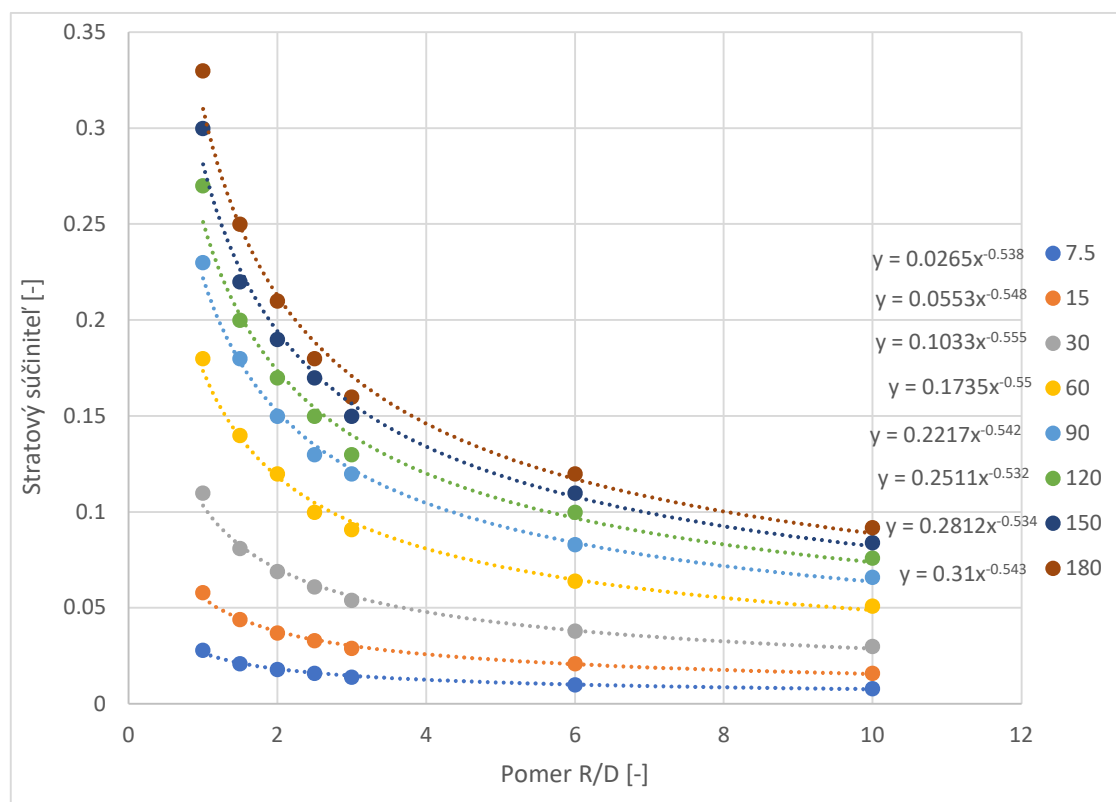
Pri spracovávaní výpočtov do výpočtového modelu bol kladený dôraz o čo najväčšiu jednoduchosť, ale hlavne o schopnosť modelu pracovať automatizovane s čo najmenej nutnými vstupmi od používateľa.

Jednou z viacerých schopností výpočtového modelu je napríklad vhodne zvolený predpis trecieho súčiniteľa, či už sa jedná o laminárne alebo turbulentné prúdenie.

Pri „manuálnych“ výpočtoch je potrebné používať a prípadne interpolovať tab. 5, ktorá slúži na určenie stratového súčiniteľa pri priechode oblúkom. Pri snahe o vytvorenie modelu, kde po zadaní vstupných parametrov už používateľ nebude zasahovať do výpočtu (tzn. interpolácia prebehne automaticky), sa táto komplikácia vyriešila nasledovne. Pomocou polynomu štvrtého stupňa bola vytvorená plocha (obr. 19), ktorá bude aproximovať všetky známe body z tabuľky. Z vytvorenej plochy môžeme získať jej predpis. So známym predpisom vzniknutej plochy už stačí len dosadiť premenné (pomer polomeru krivosti oblúku k priemeru  $R/D$ , stredový uhol  $\theta$ ) a obdržíme prislúchajúci stratový súčiniteľ.

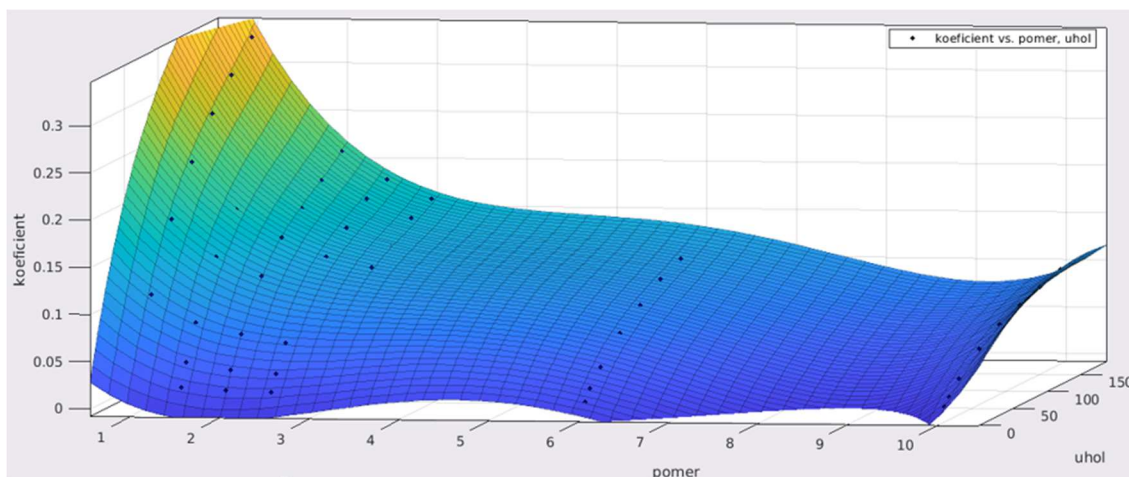
Získaný stratový súčiniteľ nám dáva zmysluplnú hodnotu len pre intervaly pokrývajúce rozsah tabuľky 5 (tzn. pre pomer  $< 1; 10 >$  a pre uhol  $< 0^\circ; 180^\circ >$ ).

Keďže vzniknutá plocha je len aproximáciou, dochádza pri výpočte k nejakým odchýlkam. Pre ďalšie spresnenie výpočtu bola pre každý uhol vypísaný v tabuľke 5 ( $7,5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ \dots$ ) vytvorená samostatná mocninová funkciu, ktorú program využije prednostne (je presnejšia ako polynommická).



**Obr. 18** Mocninové funkcie pre jednotlivé uhly

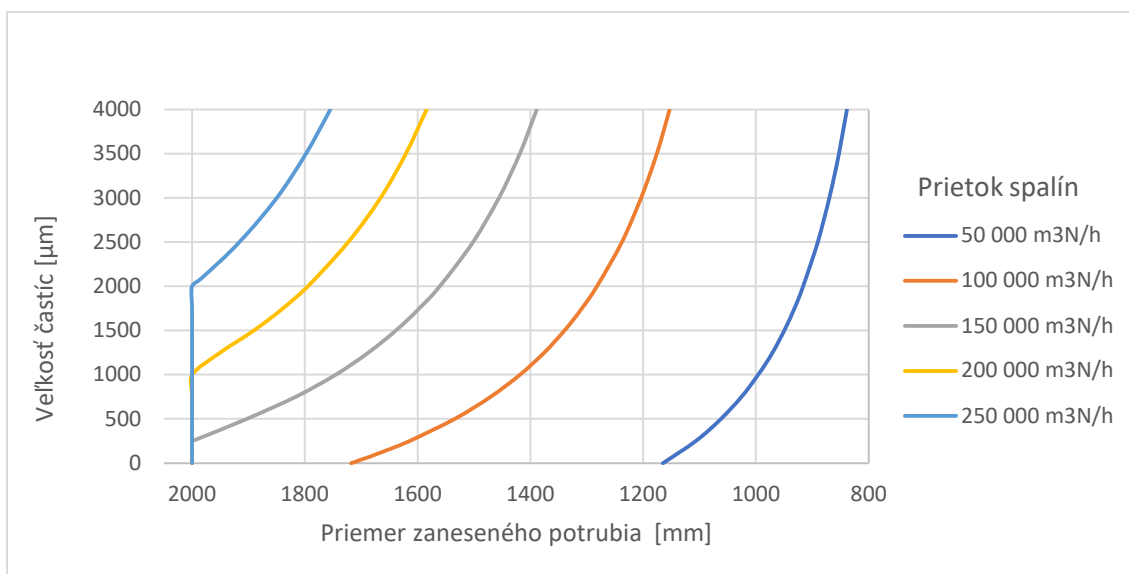
Celková chyba aproximácie dosahuje maximálne 1 %. To považujem, s ohľadom na zjednodušenie ovládania programu za prijateľnú hodnotu.



**Obr. 19** Vytvorená plocha aproximujúca body tab. 4

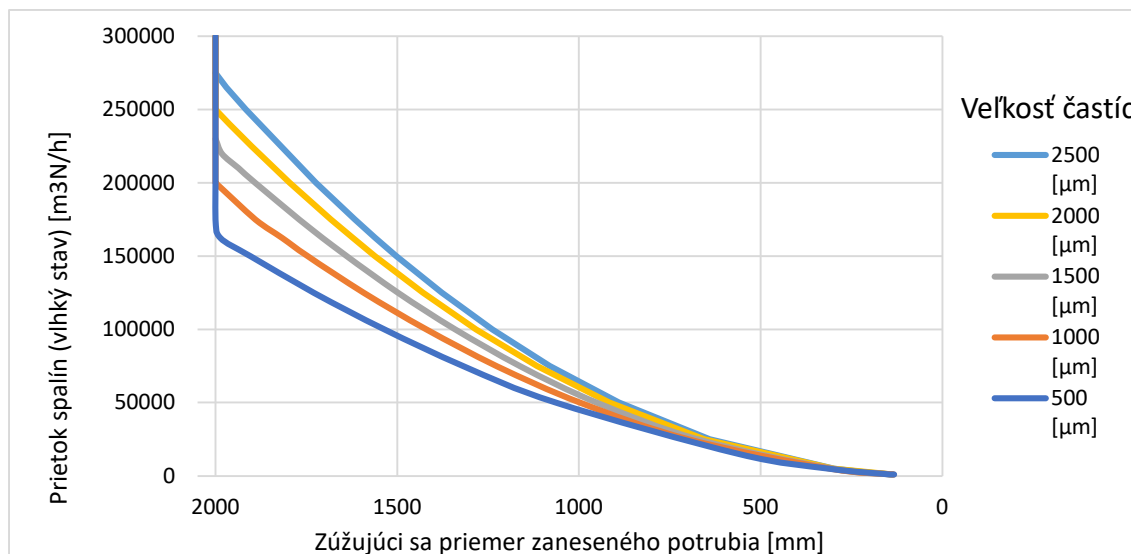
## 5.4 Grafické znázornenie popisujúce zanášanie potrubia

Pre lepšie pochopenie a znázornenie fungovania celého systému prikladám niekoľko grafických závislostí.



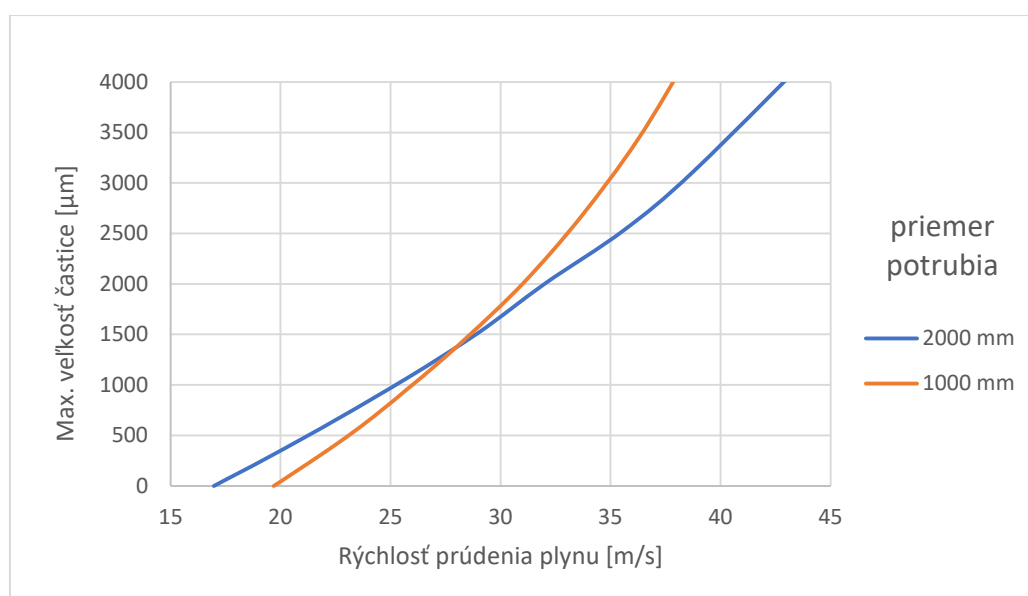
**Obr. 20** Závislosť zanesenia potrubia na veľkosti častíc pre rôzne prietoky spalín

Obr. 20 zobrazuje grafickú závislosť maximálnej veľkosti častíc vzhľadom na zanášanie potrubia. Potrebne poznamenať je, že graf bol zostrojený pre  $TZL = 55\,000\text{ kg/h}$ . Pri postupnom znižovaní prietoku plynu plynule nastane situácia, kedy je jednoducho prietok spalín príliš malý vzhľadom na hmotnostný tok častíc. Preto pri prietoku spalín napr.  $100\,000\text{ m}^3\text{N/h}$  bude nastávať usadzovanie častíc (aj menších ako  $1\text{ }\mu\text{m}$ , v závislosti na množstve zanesenia) až do priemeru približne  $1700\text{ mm}$  (pri tomto priemere sú to už jednotky  $\mu\text{m}$ ). S postupným zanášaním sa zvyšuje rýchlosť prúdenia v potrubí, preto pri väčšom zanesení sú aj väčšie častice schopné zotrvať vo vznesenom stave.



**Obr. 21** Zanášanie v závislosti na prietoku spalín pre rôzne max. veľkosti častíc

Zobrazený graf (obr. 21) je vykreslený pre interval zahrňujúci celý priemer potrubia. Aj keď sa jedná o skutočne ojedinelé prípady, slúži hlavne k zobrazeniu správania systému pre celý rozsah  $Re$  čísiel.

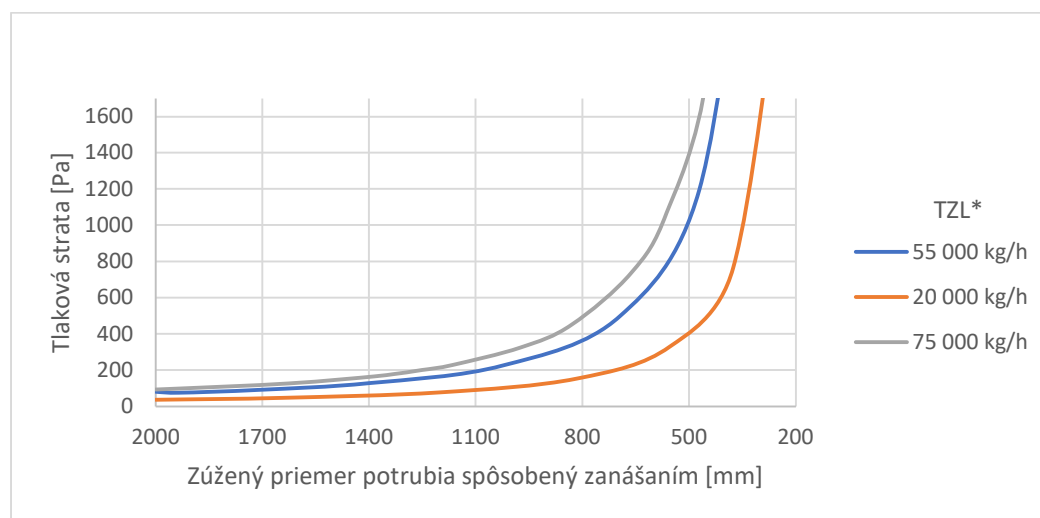


**Obr. 22** Závislosť usadzovania častíc na rýchlosti prúdenia plynu

Graf na obr. 22 zobrazuje max. veľkosť častice schopnú udržať sa v prúde toku v závislosti na rýchlosti prúdenia plynu v potrubí. Pri priemere 2000 mm sa z grafu javí, že pod rýchlosťou 17 m/s bude nastávať usadzovanie pre všetky veľkosti. To ale nie je pravda, ako už bolo spomenuté pri obr. 20, vzhľadom na pomerne vysoký hmotnostný tok častíc (55 000 kg/h) a nízku rýchlosť prúdenia v potrubí je sedimentačná rýchlosť vysoká a tok plynu nie je schopný udržať častice vo vznesenom stave, aj keď sú len

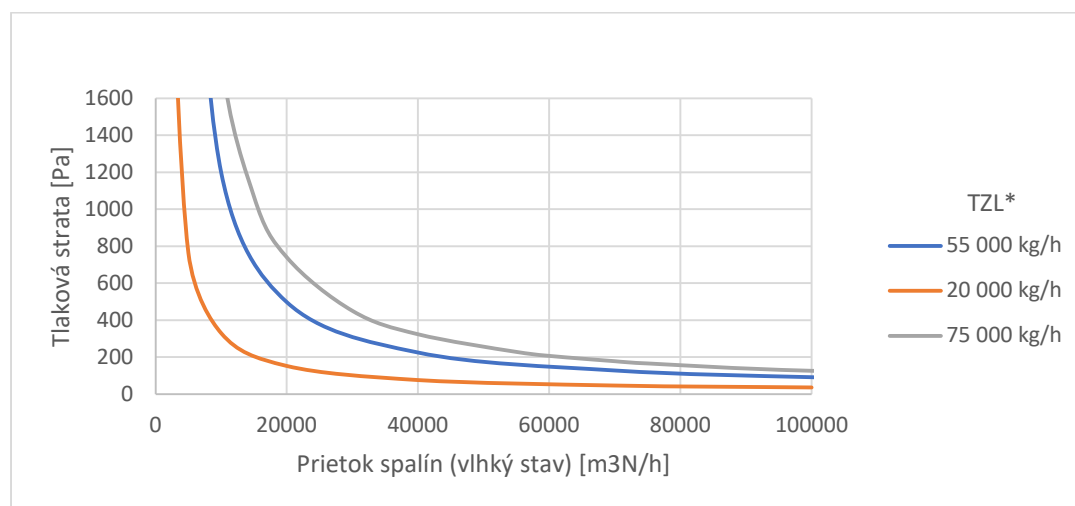
o veľkosti pod  $1\ \mu\text{m}$ . Takáto veľkosť častíc sa na grafe s ohľadom na interval od  $< 0\ \mu\text{m}; 4000\ \mu\text{m}$  > preto javí ako skoro nulová.

Z grafu (obr. 22) taktiež môžeme vidieť, že pri rovnakých rýchlostiach, ale rozličných priemeroch potrubia sa usadzujú častice o rôznych veľkostiach. Predpoklad by asi bol, že pri rovnakých rýchlostiach sa budú usadzovať rovnako veľké častice. Rozličné závislosti sú spôsobené odlišnými hmotnostnými zmiešavacími pomermi  $\mu$ . Rovnako veľké častice pri rovnako veľkých rýchlostiach v rôznych priemeroch potrubia, majú rôzne sedimentačné rýchlosti. Preto pri rýchlosti prúdenia plynu napr.  $35\ \text{m/s}$  a veľkosti častíc  $2500\ \mu\text{m}$  nastane sedimentácia skôr v potrubí s priemerom  $1000\ \text{mm}$ . Pre dané podmienky tam vychádza nižšia sedimentačná rýchlosť.



\*tuhé znečisťujúce látky (hmotnostný tok častíc)

**Obr. 23** Závislosť tlakovej straty na zanesení potrubia



\*tuhé znečisťujúce látky (hmotnostný tok častíc)

**Obr. 24** Závislosť tlakovej straty na prietoku spalín

## 5.5 Potrebný výkon ventilátoru a spotreba energie

Väčšina bakalárskej práce sa zameriavala na výpočet a vyhodnotenie tlakovej straty. Potrebné to bolo pre zistenie potrebného výkonu ventilátoru. Vypočítať ho môžeme pomocou rovnice (40).

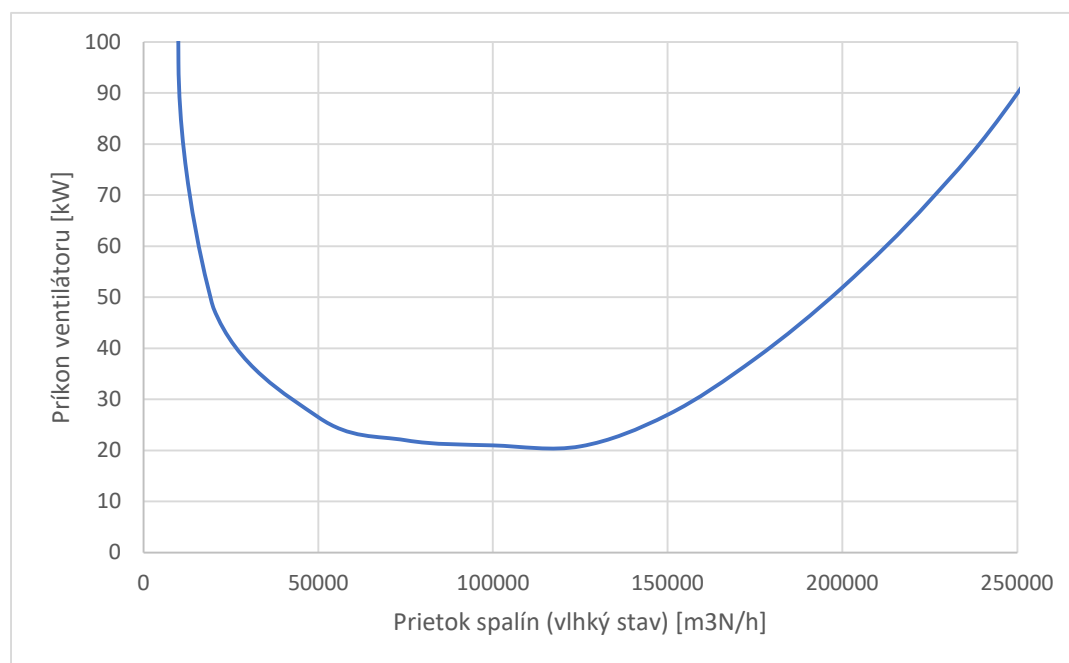
$$P_v = \dot{m} \frac{1}{\rho} \Delta p_{celk} \quad (40)$$

Z rovnice je jednoznačne zreteľné prečo znalosť tlakovej straty v potrubí je fundamentálna pre zhodnotenie energetických nákladov na prevádzkovanie spalínových ventilátorov.

V rovnici (40)  $P_v$  [kW] predstavuje výkon ventilátoru,  $\dot{m}$  [kg/s] hmotnostný tok zmesi,  $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] hustota prúdiaceho plynu a  $\Delta p_{celk}$  [kPa] celkovú tlakovú stratu.

Pre výslednú hodnotu spotreby elektrickej energie použijeme rovnicu (41), v ktorej  $P_p$  [kW] je príkon ventilátoru a  $\eta_v$  [-] je celková účinnosť ventilátoru.

$$P_p = \frac{P_v}{\eta_v} \quad (41)$$



**Obr. 25** Závislosť príkonu ventilátoru na prietoku spalín (pre TZL: 55 000 kg/h)

Na obr. 25 môžeme vidieť závislosť potrebného príkonu ventilátoru pre konfiguráciu úseku A, pre rôzne hodnoty prietoku spalín. Pre možnosť vytvorenia grafickej závislosti

bola zvolená predpokladaná účinnosť ventilátoru  $\eta_v = 0,4$  a priemerná veľkosť prúdiacich častíc  $d_p = 22,004 \mu m$ . Ako je z grafu zreteľné, so znižujúcim prietokom spalín sa znižujú trecie straty a preto aj potrebný príkon ventilátoru sa znižuje. To ale platí len do určitého prietoku. Pri nízkom prietoku spalín vzhľadom na TZL začnú sedimentovať aj častice o veľmi malých priemeroch (pod  $1 \mu m$ ). Potrubie sa bude zanášať (zmenšovať priemer) a teda aj tlakové straty budú narastať. Podľa rovnice (40) vieme, že výkon (aj príkon) sú priamoúmerné tlakovým stratám, preto aj výkon ventilátoru s narastajúcou tlakovou stratou bude musieť byť mnohonásobne vyšší. Aj tento graf slúži ako jeden z ukazovateľov na nutnosť vhodného nastavenia systému pre maximálne možné úspory energie pre pohon spalínových ventilátorov.



## 6. Záver

Predložená bakalárska práca sa venovala problému spojeným so zanášaním potrubia v cementárni. Na začiatku práce bola spracovaná obecná literárna rešerš týkajúca sa fungovania cementárenského priemyslu, využívania alternatívnych palív a ich ekologický a ekonomický dopad. V ďalších častiach som sa zamerlal na výpočet tlakových strát v potrubí, na dôvody ich vznikov a na možnosti ich zníženia.

Konkrétne sa jednalo o vznikanie nánosu, ktorý bol zapríčinený usadzovaním častíc, ktorých veľkosť bola priveľká vzhľadom na rýchlosť zdvihnutia častíc v potrubí. Dôležité je poznamenať, že tento vplyv bol len jedným z viacerých, ktoré sa podieľajú na zanášaní potrubia. Napríklad pri nadmernom výskyte vlhkosti, ktorá zvyšuje adhéziu častíc, by bola potrebná mnohonásobne vyššia rýchlosť v potrubí, aby sme predišli zanášaniu.

K práci bol vytvorený aj vlastný výpočtový model, ktorý umožňuje zadávať vstupné parametre, geometriu potrubia a následne ako výstup obdržíme sledované parametre. Zväčšený dôraz bol kladený na samostatnosť práce modelu a na vyhodnotenie možných kritických situácií potrubného systému.

Pomocou predpripraveného modelu boli spracované grafy popisujúce správanie systému pri rôznych podmienkach. Pomocou grafov a výpočtového modelu sme schopní efektívne optimalizovať, nastaviť potrubný systém vzhľadom na zníženie tlakových strát, ktoré úzko súvisia so spotrebou energie spalinovými ventilátormi.

## Zoznam použitých zdrojov

- [1] IMBABI, M. , C. CARRIGAN a S. MCKENNA. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International journal of sustainable built environment* [online]. Elsevier B.V, 2012, 1(2), 194-216. ISSN 2212-6090. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001.
- [2] GEMRICH, J. a J. JUNGSMANN. Porovnání emisní zátěže z provozu cementáren ČR s emisní zátěží z ostatních zdrojů znečištění. *Odpadové fórum*. Praha: České ekologické manažerské centrum, 1/2016, 1-11. ISSN 1804-0195.
- [3] *Zákony pro lidi* [online]. Vyhláška 452/2017 Sb., kterou se mění vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování. [15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-452>
- [4] *Commission Implementing Decision (EU) 2019/2010 of 12 November 2019 establishing the best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for waste incineration (notified under document C(2019) 7987) (Text with EEA relevance)*, 2019. [online]. 32019D2010. [13.3. 2021]. Dostupné z: [http://data.europa.eu/eli/dec\\_impl/2019/2010/oj/eng](http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2019/2010/oj/eng)
- [5] MAGRLA, R. *Modifikace vlastností portlandských cementů orientovaná na snížení emisí CO<sub>2</sub>*. Brno, 2013. 114.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
- [6] CHINYAMA M. Alternative Fuels in Cement Manufacturing. *Alternative Fuel* [online]. 2011. ISBN 978-953-51-4461-8. Dostupné z: doi: 10.5772/22319.
- [7] ABBAS, T., Michalis A. a S. S. AKHTAR. Reducing pressure drop in pyro-processing. *2018 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*, Nashville, TN, 2018, 1-11. ISSN 2155-9155. Dostupné z: doi: 10.1109/CITCON.2018.8373111.
- [8] VAVŘÍN, F. *Maltoviny*. 2. nezm. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974, 250 s.
- [9] SCHORCHT, F., KOURTI, I., SCALET, B., ROUDIER, S., SANCHO, L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. 2013, DOI: 10.2788/12850
- [10] GOMES, L. M. a A. L. A. MESQUITA. On the prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* [online]. 2014, 31(1), 35–46. ISSN 0104-6632. Dostupné z: doi:10.1590/S0104-66322014000100005

- [11] Preheaters and precalciners. PSP ENGINEERING, a.s. [online]. Přerov, 2009 [10.02.2021].
- [12] VDI, VDI heat atlas, Springer,, Berlin ; London, 2010 ISBN 9783540778776 3540778772.
- [13] SMITS, A.J., A physical introduction to fluid mechanics, John Wiley, New York, 2000 0471253499 (alk. paper).
- [14] IDELCHIK, I.E., STEINBERG, M.O., Handbook of hydraulic resistance, CRC Press, Boca Raton, FL, 1994 0849399084 (alk. paper).
- [15] PETRE, I., MENICU, M., MOHANU, I., BERNEA, F. a ȘERBAN, C., 2016. Influence of bypass degree on the alkalis content from clinker. *Revista Romana de materiale = Romanian journal of materials = RRM*. 1 January 2016. Vol. 46, p. 222–226.
- [16] CORTADA MUT, M. del Mar, NØRSKOV, L. K., FRANDSEN, F. J., GLARBORG, P. a DAM-JOHANSEN, K., 2015. Circulation of Inorganic Elements in Combustion of Alternative Fuels in Cement Plants. *Energy & Fuels*. 16 July 2015. Vol. 29, no. 7, p. 4076–4099. Dostupné z: doi: 10.1021/ef502633u.
- [17] VÁVRA, A.: Pneumatická doprava dřevěného odpadu, kapitola 4.4 v knize Hejma, J., Budinský, K., Vávra, A., Drkal, F.: *Vzduchotechnika v dřevozpracovávajícím průmyslu*, SNTL, Praha, 1981
- [18] URBAN, J.: *Pneumatická doprava*, SNTL, Praha, 1964
- [19] Pneumatic Transport and Standpipes, 2008. In: *Introduction to Particle Technology* [online]. John Wiley & Sons, Ltd. p. 211–245. [29.3.2021]. ISBN 978-0-470-72710-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9780470727102.ch8>
- [20] BRIENS, C.L., 1991. Correlation for the direct calculation of the terminal velocity of spherical particles in newtonian and pseudoplastic (power-law) fluids. *Powder Technology*. July 1991. Vol. 67, no. 1, p. 87–91. Dostupné z: DOI 10.1016/0032-5910(91)80030-M.
- [21] HEMERKA, J.: *Teoretické základy pneumatické dopravy*, Fakulta strojní ČVUT v Praze
- [22] HERBERT OFFOR, U., ALABI, S., An Accurate and Computationally Efficient Explicit Friction Factor Model, 2016 06
- [23] NAVEH, R., TRIPATHI, N. M. a KALMAN, H, 2017. Experimental pressure drop analysis for horizontal dilute phase particle-fluid flows. *Powder Technology*. [18.2.2021]. Vol. 321, p. 355–368. Dostupné z: DOI 10.1016/j.powtec.2017.08.029.

**Zoznam použitých symbolov a skratiek**

<b>Symbol</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$a$	Funkčná závislosť	[-]
$a_1$	Parameter definovaný rovnicou (27)	[-]
$b_1$	Parameter definovaný rovnicou (28)	[-]
$C$	Konštanta pre jednotlivé plynu (v [13])	[-]
$d$	Bezrozmerný priemer častice	[-]
$d_p$	Priemerná veľkosť častíc	[m]
$D$	Priemer potrubia	[m]
$Fr_D$	Froudove číslo ( $\sim w$ )	[-]
$Fr_{D,\infty}$	Froudove číslo ( $\sim U_t$ )	[-]
$g$	Gravitačné zrýchlenie	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_s$	Hmotnostný tok častíc na m <sup>2</sup>	[kg/m <sup>2</sup> ·s]
$K$	Stredná hodnota nerovnosti povrchu	[mm]
$l$	Dĺžka potrubia	[m]
$l_h$	Horizontálna dĺžka potrubia	[m]
$l_s$	Dĺžka potrubia pod sklonom $\varphi$	[m]
$l_v$	Vertikálna dĺžka potrubia	[m]
$\dot{m}$	Hmotnostný tok zmesi (častice, plyn)	[kg/s]
$\dot{m}_g$	Hmotnostný tok plynu	[kg/s]
$m_i$	Hmotnosť zložky zmesi	[kg/m <sup>3</sup> ]
$M_i$	Molárna hmotnosť zložky	[kg/mol]
$M_s$	Hmotnostný tok častíc	[kg/s]
$p_f$	Tlak v potrubí	[Pa]
$p_n$	Normálový tlak	[Pa]
$P_p$	Príkon ventilátoru	[kW]
$P_v$	Výkon ventilátoru	[kW]
$r$	Špecifická plynová konštanta	[J/kg·K]
$r_o$	Polomer krivosti oblúku	[mm]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$R_m$	Univerzálna plynová konštanta	[J/mol·K]
$S$	Prierez potrubia	[m <sup>2</sup> ]

$T$	Teplota	[°C]
$T_f$	Prevádzková teplota	[°C]
$T_n$	Normálová teplota	[°C]
$u$	Bezrozmerná pádová rýchlosť	[-]
$u_s$	Stredná rýchlosť častíc	[m/s]
$u_{salt}$	Sedimentačná rýchlosť	[m/s]
$U_t$	Pádová rýchlosť častice	[m/s]
$V$	Objem plynu	[m³]
$\dot{V}$	Objemový prietok	[m³/s]
$V_m$	Molárna objemová konštanta	[m³/mol]
$\dot{V}_n$	Prietok spalín (vlhký stav)	[m³N/h]
$V_s$	Objem materiálu	[m³]
$V_{sm}$	Objem zmesi	[m³]
$w$	Rýchlosť prúdenia plynu	[m/s]
$w_i$	Hmotnostné podiely zložiek plynu	[-]
$w_u$	Parameter definovaný rovnicou (10)	[m/s]
$x_i$	Objemový zlomok zmesi	[-]
$\alpha$	Koeficient (tab. 2)	[-]
$\beta$	Koeficient (tab. 2)	[-]
$\gamma$	Súčiniteľ polohy oblúku	[-]
$\delta$	Parameter definovaný rovnicou (11)	[m]
$\Delta$	Relatívna (ekvivalentná) drsnosť	[-]
$\Delta p_{celk}$	Tlaková strata (celková)	[Pa]
$\Delta p_{g1}$	Tlaková strata (trenie plynu)	[Pa]
$\Delta p_{g2}$	Tlaková strata (urýchlenie plynu)	[Pa]
$\Delta p_{g3}$	Tlaková strata (miestne odpory)	[Pa]
$\Delta p_{s1}$	Tlaková strata (trenie častíc)	[Pa]
$\Delta p_{s1,v}$	Tlaková strata (vertikálne trenie častíc)	[Pa]
$\Delta p_{s1,h}$	Tlaková strata (horizontálne trenie častíc)	[Pa]
$\Delta p_{s2}$	Tlaková strata (urýchlenie častíc)	[Pa]
$\Delta p_{s3}$	Tlaková strata (oblúk, častice)	[Pa]
$\varepsilon$	Pórovitosť	[-]

$\zeta$	Stratový súčiniteľ	[-]
$\eta$	Dynamická viskozita plynu	[Pa·s]
$\eta_0$	Dynamická viskozita plynu pri 0°C	[Pa·s]
$\eta_i$	Viskozita jednotlivých zložiek plynu	[Pa·s]
$\eta_{mix}$	Viskozita zmesi plynov	[Pa·s]
$\eta_v$	Účinnosť ventilátoru	[-]
$\varphi$	Sklon potrubia	[°]
$\phi$	Stredový uhol	[°]
$\Phi_s$	Vlhkosť spalín	[g/m³N]
$\lambda_g$	Súčiniteľ trenia plynu	[-]
$\lambda_s$	Súčiniteľ trenia častíc	[-]
$\lambda_{s,Barth}$	Súčiniteľ trenia častíc (horizontálne)	[-]
$\lambda_{s,v}$	Súčiniteľ trenia častíc (vertikálne)	[-]
$\mu$	Hmotnostný zmiešavací pomer	[-]
$\rho_g$	Hustota plynu	[kg/m³]
$\rho_i$	Hustota zložky zmesi plynu	[kg/m³]
$\rho_s$	Hustota častíc	[kg/m³]
$\nu$	Kinematická viskozita plynu	[m²/s]